

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Российский фонд фундаментальных исследований

**Энерго- и ресурсосбережение.  
Энергообеспечение.  
Нетрадиционные и возобновляемые  
источники энергии**

**Том 1**

**Материалы Всероссийской научно-практической  
конференции студентов, аспирантов и молодых ученых  
с международным участием  
(Екатеринбург, 16–19 декабря 2014 г.)**

*Под общей редакцией  
д-ра экон. наук, проф. Н. И. Данилова*

Екатеринбург  
УрФУ  
2015

УДК 620.9-049.35106  
ББК 31.190.7я431  
Э65

**Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии:** материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 16–19 декабря 2014 г.) / Под общ. ред. д-ра экон. наук, проф. Н. И. Данилова : в 2 т. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – Т. 1. – 280 с.

ISBN 978-5-321-02435-5 (т. 1)  
ISBN 978-5-321-02434-8

В сборник включены материалы и тезисы докладов, представленные на Всероссийской научно-практической конференции. Тезисы докладов отражают широкий диапазон научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых вузов, предприятий и организаций России, стран СНГ и дальнего зарубежья по проблемам энергосбережения, энергообеспечения, повышения эффективности использования энергетических ресурсов и создания нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Сборник материалов конференции состоит из 2-х томов. В 1-й том входит раздел «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности. Энергообеспечение», во 2-й том – разделы «Ресурсосбережение и повышение экологической эффективности. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Малая энергетика».

УДК 620.9-049.35106  
ББК 31.190.7я431

*Организационный комитет:*

Князев С. Т. (председатель оргкомитета)  
Кружаев В. В. (сопредседатель оргкомитета)  
Балдин В. Ю. (ответственный секретарь)

Авраменко Е. С.	Краснова А. В.
Алехин В. Н.	Лихтенштейн В. И.
Барашев А. Р.	Май С. А.
Безматерных М. А.	Малыгин В. Ю.
Бегалов В. А.	Микула В. А.
Белоусов В. С.	Моржерин Ю. Ю.
Белоусова О. А.	Мунц В. А.
Богатова Т. Ф.	Немихин Ю. Е.
Бродов Ю. М.	Паздерин А. В.
Вараксин М. В.	Плотников П. Н.
Велькин В. И.	Попов А. И.
Герасимова Е. С.	Раков О. А.
Гольцев В. А.	Рыжков А. Ф.
Дени М. В.	Сарапулов С. Ф.
Дубинин А. М.	Селезнева И. С.
Жилин А. С.	Силин В. Е.
Жуков А. А.	Семенов Г. А.
Иваницкая Р. Л.	Толстова Ю. И.
Капустин Ф. Л.	Тупоногов В. Г.
Козлов В. В.	Худякова Г. И.
Кокин С. Е.	Черных И. В.
Коняев А. Ю.	Шимов В. В.
Корелин А. В.	Щеклеин С. Е.
Котов О. М.	Ярошенко Ю. Г.

Сборник издан при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-38-10313)

ISBN 978-5-321-02435-5 (т. 1)  
ISBN 978-5-321-02434-8

© Уральский федеральный  
университет, 2015  
© Авторы статей, 2015

*Уважаемые участники, организаторы и гости  
Всероссийской студенческой олимпиады, выставки  
и научно-практической конференции!*

Устойчивое и надежное энергообеспечение страны – важнейший элемент государственной стратегии развития, а энергоэффективность и энергосбережение занимают приоритетные позиции во внутренней и внешней политике всех без исключения государств мирового сообщества.

Рациональное использование энергетических ресурсов является одним из наиболее важных вопросов для экономики нашей страны. Президент Российской Федерации не раз отмечал, что энергосбережение, повышение энергоэффективности превращаются в один из основных трендов всемирной экономики. Работу по энерго- и ресурсосбережению Президент назвал «ключевым направлением для модернизации экономики и социальной сферы страны».

Пять лет назад вступил в действие Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...». Принятый закон, действующая в стране Государственная программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности на период до 2020 года направлены на реализацию активно проводимой государством политики сбережения и рационального использования энергетических ресурсов.

Успешная реализация этой политики возможна только при активном участии молодых специалистов, выпускников вузов, способных с полным пониманием квалифицированно реализовывать конкретные мероприятия в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Поэтому сегодня отечественной экономике крайне необходим приток молодых высококвалифицированных специалистов и ученых со сформированной идеологией энергосбережения.

Губернатор и Правительство Свердловской области неоднократно указывали на необходимость подготовки молодых специалистов инженерных профессий, способных создавать новые и оптимизировать действующие процессы производства, передачи и потребления энергии, посвятить свою научную деятельность поиску новых источников энергии и способов эффективного их использования.

В Свердловской области все большее внимание уделяется вопросам стимулирования студентов, аспирантов и молодых ученых к творческой деятельности, в том числе участию в энерго- и ресурсосберегающих исследованиях и проектах, а также в профессиональных конкурсах. В этой связи особенно хочется отметить результаты работы ряда кафедр Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Института энергосбережения, которые успешно осуществляют научно-методическую и образовательную деятельность по повышению энергетической эффективности экономики и подготовке кадров в Свердловской области.

Творчество молодежи активно поддерживается региональными органами государственной власти и бизнеса. Разработки молодых ученых и специалистов регулярно демонстрируются на выставках, конференциях и форумах. На ставших традиционными международных выставках «ИННОПРОМ», энергетическом форуме «Энерго-ПромЭкспо» ежегодно презентуются экспозиции энергоэффективной техники и технологий, где особое место занимают проекты и материалы, разработанные при участии молодежи.

Важно и впредь вовлекать молодых ученых и специалистов в систему информационного обмена, обобщать представленные результаты в области энерго- и ресурсосбережения, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, а также привлекать молодежь к научно-практическому творчеству. Считаю, что мероприятия Всероссийской студенческой олимпиады, конференции и выставки зарекомендовали себя как эффективная коммуникационная площадка для этих целей.

**Желаю всем участникам Всероссийской студенческой олимпиады, конференции и выставки плодотворной творческой работы по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики, успешной практической реализации творческих идей, успехов в освоении новых знаний и заслуженных побед!**

Директор Уральского  
энергетического  
института УрФУ,  
доктор технических наук,  
профессор



С. Ф. Сарапулов



## **ПЕРВЫЙ В РОССИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ДОМ КЛАССА А+ СТРОИТСЯ НА УРАЛЕ**

Как известно, здания во всем мире являются основными потребителями энергетических ресурсов. Снижение энергопотребления такими объектами – общемировая проблема. Задачу повышения энергоэффективности зданий решают различными способами: совершенствуя и ужесточая законодательство, разрабатывая проекты самых современных зданий, а также осуществляя планирование и реализацию энергосберегающих мероприятий на этапах реконструкции и капитального ремонта существующих зданий [1–4]. Опыт показывает, что добиться выполнения требований энергоэффективности в сочетании с обеспечением максимально комфортных условий для жителей и минимальным воздействием на окружающую среду в полной мере можно только при проектировании, строительстве и эксплуатации нового здания.

В ноябре 2014 г. в Екатеринбурге прошел семинар, организованный компанией VELUX [5], где подробно обсуждались эти вопросы и участникам которого был представлен проект первого в России энергоэффективного дома эконом-класса «Дом А+», строящегося на территории ЖК «Экодолье» (пос. Горный Щит) компаниями, имеющими большой опыт энергосберегающего строительства в России.

Среди авторов проекта, имеющих также опыт участия в осуществлении проектов энергоэффективных зданий за рубежом – в Германии, Австрии, Дании, Франции, Денис Дементьев, главный архитектор компании «НЛК Домостроение», Олег Панитков, директор по развитию компании VELUX, Вениамин Тележный, генеральный директор компании Magnum Haus, и другие.

При создании концепции проекта учитывались современные архитектурные тенденции, факторы, влияющие на энергосбережение, здоровье жителей и окружающую среду, а также экономическая целесообразность архитектурных решений. В 2014 г. проект «Дом А+» стал лауреатом Green Awards среди проектов отдельных малоэтажных зданий, представленных на V Всероссийском конкурсе по экологическому девелопменту и энергоэффективности, проводившемся при поддержке Министерства строительства и ЖКХ РФ, Министерства энергетики РФ и Министерства природных ресурсов и экологии РФ.

Участникам семинара продемонстрировали строение (рис. 1), начатое в июне 2014 года, уже имеющее фундамент, стены, кровлю, окна, другие элементы, которые отличаются от обычных конструкций своими энергоэффективными решениями.

Фундамент «Дома А+» залит по технологии «Утепленная шведская плита» (УШП) и не только послужит прочным и надежным основанием, но и ста-

нет «тепловым аккумулятором» для всего дома, благодаря интегрированному в фундаментную плиту теплomu полу. Стены «Дома А+» возведены по технологии крупнопанельного деревянного домостроения с последующей обкладкой их кирпичом, что продиктовано требованиями внешнего облика строений ЖК «Экодолье». В ограждающих конструкциях дома применены современные экологичные материалы, в том числе минераловатные утеплители (каменная вата), которые до 4 раз эффективнее дерева и до 20 раз эффективнее кирпича. Материал не образует пустот, что сводит потери тепла практически к нулю. В итоге дом будет надежно сохранять тепло зимой и прохладу летом, что значительно снизит затраты жильцов на энергоносители [6].



Рис. 1. Внешний вид «Дома А +» на этапе строительства (ноябрь 2014 г.)

Расчетное значение расхода тепловой энергии на отопление (по методике PHPP – Passivhaus Projektierungs-Paket – Пакет проектирования пассивного дома Института пассивного дома в России – ИПД [7]) составляет  $124 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$  в год, и следовательно, отопление «Дома А+» площадью 155 кв. м обойдется в 5668 руб. в год. Стоимость горячего водоснабжения составит 4010 руб., из расчета  $88 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$  в год. Для снижения расходов на горячее водоснабжение будут использоваться солнечные коллекторы. Большая поверхность дома сориентирована на юг для максимально эффективного использования пассивной солнечной энергии (рис. 2, 3).

По расчетам, проведенным консультантом проекта – директором ИПД А. Е. Елоховым, выпускником строительного института УрФУ (бывшего стройфака УГТУ-УПИ), сделавшим очень интересный доклад на семинаре о

мировом и отечественном опыте строительства энергоэффективных (пассивных) зданий, «Дом А+» превышает нормы СНиПа по теплозащите зданий на 71 % и соответствует классу энергоэффективности А++.



Рис. 2. Внешний вид «Дома А +»: как он будет выглядеть после завершения строительства

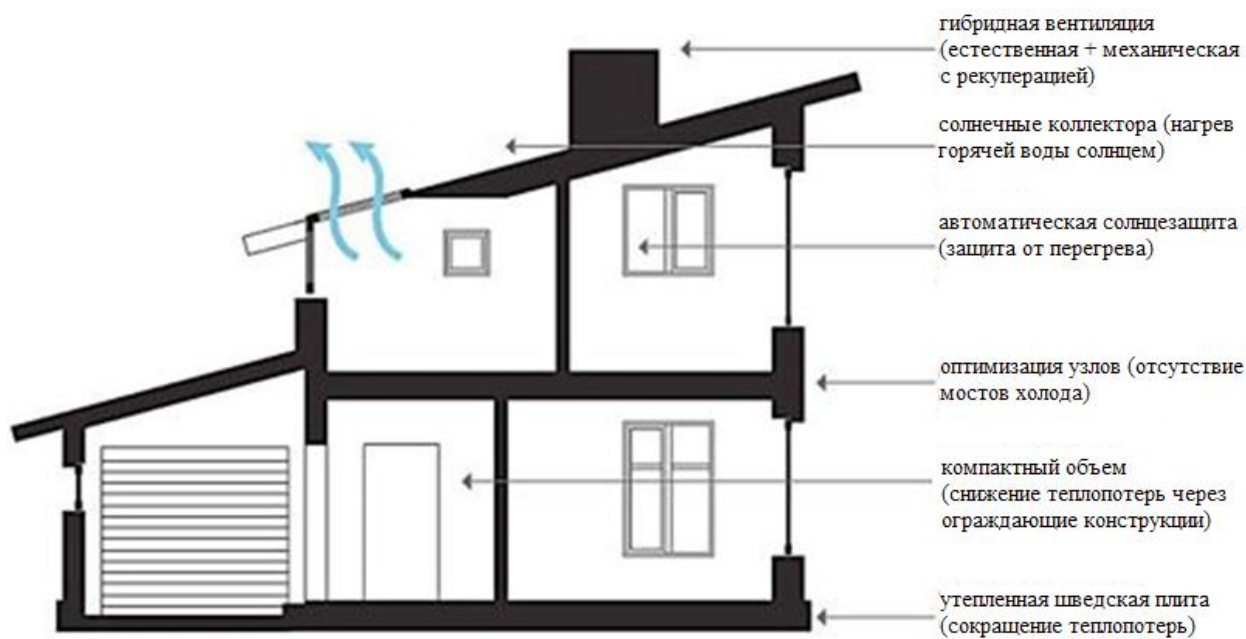


Рис. 3. Основные энергоэффективные решения «Дома А +»



По информации, представленной на семинаре, себестоимость строительства зафиксирована на уровне стоимости одного квадратного метра продаваемого и готового к заселению здания, равной не более 45 тыс. руб. за 1 м<sup>2</sup> [8]. С учетом стоимости земельного участка (около 7 соток) и коммуникаций (дороги, сети) цена одного квадратного метра «Дома А +» составляет около 62 тыс. руб. за 1 м<sup>2</sup>.

В работе семинара приняли участие специалисты из Москвы, Минска, Челябинска, Екатеринбурга, в том числе студенты и преподаватели Урал-ГАХА и УрФУ.

В Свердловской области уже есть энергоэффективный дом, спроектированный, построенный и эксплуатирующийся специалистами УрФУ в пос. Растущем Белоярского района. Научный руководитель этого проекта, получившего в 2009 г. Национальную экологическую премию в номинации «Энергия будущего», – заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УралЭНИН проф. С. Е. Щеклеин. Однако этот проект реализован путем перепрофилирования и реконструкции существующего заброшенного сельскохозяйственного строения.

Первый проект в России, где энергоэффективность, здоровый микроклимат и бережное отношение к природе не противоречат друг другу, но представляют собой единую комплексную систему, состоящую из взаимодополняющих элементов, был реализован в Подмоскovie из доступных сегодня на российском рынке материалов. Полученные в ходе проекта результаты используются для разработки единых российских стандартов «зеленого» строительства [9].

«Активный дом» представляет собой индивидуальный жилой дом общей площадью 230 м<sup>2</sup>, построенный в 20 км от Москвы в 2011 г. Проект «Активный дом» разработан молодыми архитекторами экспериментальной лаборатории POLYGON.

Концепция Active House получает сегодня все большее распространение в странах Европы [10] и представляет собой комплексную систему, цель которой – достижение баланса между энергосбережением, комфортным проживанием и бережным отношением к природе.

Дом представляет собой комплекс решений в области энергоэффективности, инновационных технологий и использования экологически чистых материалов, с учетом специфики домостроения в России.

Энергоэффективность. Для оптимизации энергетических параметров «Активного дома» проводился всесторонний анализ здания на этапе проектирования и жесткий контроль за качеством строительства. В «Активном доме» применена каркасная технология, при этом конструкция каркаса разработана таким образом, чтобы обеспечить максимально возможный коэффициент однородности всех ограждающих поверхностей.

Теплопотери в доме значительно снижены за счет качественной и максимально эффективной теплоизоляции. В проекте используется теплоизоляция в плитах ISOVER Каркас-П32 (продукция компании «Сен-Гобен Строительная Продукция»), обладающих максимально низким коэффициентом теплопроводности и специально разработанных для каркасных домов. Внутренняя сторона

стен обшита гипсокартоном высокой плотности, что придает легкой деревянной каркасной конструкции дополнительную теплоемкость. Дом использует различные источники энергии, которые интегрированы в единую систему.

Одним из основных источников жизнеобеспечения дома является энергия солнца как наиболее доступная на сегодняшний день. Солнечные коллекторы VELUX установлены в комбинациях с мансардными окнами, являются визуально привлекательными и простыми в эксплуатации. Среди инженерных систем, положительно влияющих на энергобаланс здания, нужно выделить высокоэффективный тепловой насос и систему теплого пола производства «Данфосс», систему вентиляции с рекуперацией тепла и солнечные батареи для производства электрической энергии.

Результаты расчета энергопотребления, осуществленные Институтом пассивного дома (Россия) совместно с компанией «Сен-Гобен Строительная Продукция» по методике РНПР, показывают, что удельный расход тепловой энергии на отопление «Активного дома» за отопительный период составляет  $38 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  в год, а по методике СНиП –  $30 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  в год. Общий удельный расход первичной энергии на все бытовые нужды составляет около  $110 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  в год. Такие показатели в 4–5 раз ниже существующего стандарта и в 7–9 раз ниже среднего энергопотребления.

Здоровый микроклимат. В «Активном доме» созданы здоровые и комфортные условия проживания, обеспечивается максимальный уровень естественной освещенности и регулярная циркуляция свежего воздуха.

Архитектура дома обеспечивает проникновение дневного света во все помещения благодаря стратегически расположенным мансардным окнам VELUX и фасадным окнам. Естественное освещение играет важнейшую роль в жизни человека и оказывает влияние на его здоровье и развитие. Чтобы обеспечить высокие показатели естественного освещения, на этапе проектирования проводилось моделирование естественного освещения, в результате чего было рассчитано необходимое количество окон и их оптимальное местоположение. Моделирование выполнялось с использованием программного обеспечения VELUX Daylight Visualizer 2, специально разработанного для расчета и анализа уровня естественной освещенности помещений [11].

Результаты моделирования показывают, что все помещения в «Активном доме» имеют высокий уровень естественной освещенности (КЕО). В российских нормах минимальное значение КЕО – 0,5, что недостаточно даже для комфортного ориентирования человека в помещении без искусственного освещения. В «Активном доме» значение КЕО – 5 (то есть в 10 раз больше), средний показатель КЕО в жилых комнатах и кухне – 6,8.

Максимальный комфорт достигается также за счет использования естественной вентиляции. В «Активном доме» предусмотрена «гибридная» вентиляция: за счёт автоматики, когда температура на улице выше 10 градусов, используется естественная вентиляция, а при понижении температуры подключается механическая. Система управления микроклиматом отслеживает такие параметры, как влажность, уровень  $\text{CO}_2$ , яркость солнца, скорость ветра, внутренняя и наружная температура, и в зависимости от этого регулирует уровень есте-

ственной или искусственной вентиляции. Система управления микроклиматом помещений предоставлена компанией Window Master. В систему интегрируются мансардные окна VELUX INTEGRA, фасадные окна, солнцезащитные системы, теплый пол, вентиляция. Система управления удобна и проста в эксплуатации. Параметры внутреннего микроклимата заносятся в систему и контролируются с учетом персональных предпочтений обитателей дома.

*Окружающая среда.* В домах, проектируемых в соответствии с концепцией Active House, всегда учитываются климатические условия местности, а также уделяется большое внимание анализу жизненного цикла здания и минимизации отрицательного воздействия на окружающую среду в процессе всего срока эксплуатации.

Первый в России «Активный дом» адаптирован под конкретные климатические условия Подмосковья с учетом влажного континентального климата с теплым летом и долгой холодной зимой. Дом оказывает минимальное воздействие на экологическую обстановку окружающей его местности. Он построен из материалов, которые имеют высокий процент содержания перерабатываемых компонентов, обладают способностью к самостоятельной утилизации или пригодны к повторному использованию.

В качестве основы для «Активного дома» был заложен свайный фундамент, который идеально отвечает геологическим особенностям участка застройки и является максимально экологичным решением. Каркас дома выполнен из сосны и был собран непосредственно на строительной площадке. Используемая древесина (марка «НЛК Домостроение») обладает экологической маркировкой FSC, которая выдается независимыми аудиторами на основании строгой ежегодной проверки мест заготовки леса, а также экологического контроля на всех этапах производства деталей и материалов. Каркасная технология обеспечивает максимальное энергосбережение за счет наличия нескольких «слоев» конструкции стен и эффективного утепления.

Для того чтобы понять, как работают те или иные системы, установленные в доме, а также оценить их эффективность, мало одних расчетных показателей, ведь в реальной жизни все может отличаться. Чтобы получить самые объективные данные, компании «Загородный Проект» и VELUX пригласили для временного проживания в доме гостевую семью. С декабря 2011 года по апрель 2012 года мониторинг работы всех систем во время проживания семьи позволил выявить плюсы и минусы применения энергоэффективных технологий в условиях российского климата.

Эксперты компании смогли провести исследования в два этапа: до и после активной эксплуатации дома. По итогам первых пяти месяцев проживания участники проекта пришли к выводу, что использование эффективной теплоизоляции и современных инженерных систем, установленных в «Активном доме», позволило сократить эксплуатационные расходы в 10 раз по сравнению с обычными домами.

«При создании проекта «Активного дома» мы комплексно подошли к вопросам создания микроклимата внутри помещений, максимального использования пассивных и активных методов энергосбережения. Для этого была созда-

на уникальная система, каждый компонент которой играет свою роль в комплексном обеспечении энергоэффективности всего объекта. При этом наблюдается и обратная связь – эффективность работы каждого элемента зависит от правильной эксплуатации всей инженерной схемы в целом. Поэтому итоги первого периода эксплуатации «Активного дома» имеет смысл рассматривать именно через призму комплексного подхода», – рассказывает Олег Панитков, директор по развитию компании VELUX.

Один из главных компонентов общей системы – это, по сути, само здание. Правильно подобранная и качественно выполненная теплоизоляция, специально разработанный каркас, снижающий влияние так называемых «тепловых мостов», проработка узлов примыкания и повышение герметичности оболочки здания позволили получить максимальную отдачу от использования альтернативных источников энергии.

Так, использование теплового насоса (ТН) дало значительное снижение (72 %) расхода электроэнергии по сравнению с электрическим котлом. Средний сезонный коэффициент преобразования ТН, с учетом работы всего встроенного электрического оборудования, включая трубчатые электронагреватели, составил 3,6 единиц, т. е. на 1 кВт·ч электроэнергии, затраченной на работу установки, на выходе получается в 3,6 раза больше тепловой энергии. Таким образом, при общей выходной мощности ТН, равной 9,4 кВт·ч, около 6,78 кВт·ч – это энергия, полученная за счет тепла земли.

Другим важным компонентом стало использование солнечных коллекторов, которые полностью оправдали себя – подогрев воды на 70 % обеспечивался солнечной энергией, что позволяет экономить до 28 тыс. руб. в год. Стоит оговориться, что из-за особенностей российского климата эффективность работы солнечных коллекторов сильно зависит от сезона. В январе-феврале обильный снежный покров не позволил им работать на полную мощность, однако уже в начале весны система показала свою эффективность: в марте солнечная энергия обеспечила 344 кВт·ч из 433 затраченных, а в апреле количество энергии, произведенной солнечными коллекторами, даже превысило данный показатель (527 кВт·ч против 400).

Помимо показателей экономии энергии, инженеры также уделили внимание и качеству жизни в «Активном доме». Благодаря хорошему микроклимату, создаваемому в доме за счет «умных» систем фильтрации воздуха, вентиляции и обогрева, в зимний период в семье никто не болел. Специалисты компании EcoStandard, также проводящие мониторинг работ систем «Активного дома», отмечают, что в помещениях обычного загородного дома, построенного по общепринятым российским стандартам, воздух вряд ли можно назвать очень чистым. Он насыщен фенолом и аммиаком, которые выделяются из составов, добавляемых в раствор для ускорения затвердевания бетона. В «Активном доме» эта проблема полностью решена: за счет применения экологически чистых строительных материалов, а также установки «гибридной» вентиляции и специальных сенсорных датчиков, улавливающих рост объема CO<sub>2</sub>, в доме постоянно поддерживается оптимальный уровень кислорода и влажности.

Нельзя не отметить и большую площадь остекления за счет мансардных и фасадных окон, которая также положительно сказывается на качестве жизни. Уровень естественного освещения в «Активном доме» в 10 раз превышает требования СНиПа. Достигнутый показатель соответствует комфортному уровню освещения и способствует нормальной работе организма человека. Многочисленные исследования доказали, что естественное освещение влияет на работу эндокринной системы человека, в частности на выработку серотонина и мелатонина. Для энергосбережения этот фактор также играет большую роль. Во-первых, сокращается время использования искусственного освещения, что, в свою очередь, существенно сокращает затраты на электричество. Во-вторых, большая часть окон расположена на южном фасаде, за счет этого помещение дополнительно прогревается. По подсчетам специалистов, теплопоступления за счет южной ориентации составляют около 7 тыс. кВт·ч в год.

Однако существовал и ряд трудностей, с которыми пришлось столкнуться инженерам, одна из которых – превышение температурного режима в комнатах «Активного дома». Для предварительных расчетов были взяты 20 °С, что соответствует СНиПу и методике Института пассивного дома в России. Однако жильцы «Активного дома» выбрали более комфортную для себя температуру – 25 °С. Корректировка этого параметра на 20 % привела к увеличению потребления энергии с расчетных 38 кВт·ч/м<sup>2</sup> до 56 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год. Но даже при таких показателях «Активный дом» потреблял почти в 5 раз меньше энергии, чем обычный дом, построенный без использования энергосберегающих материалов (250 кВт·ч/м<sup>2</sup>). Кроме того, за счет постоянного посещения дома группами специалистов и активного образа жизни семьи увеличилась частота открывания входных дверей, что привело к повышению инфильтрации воздуха. За счет этого герметичность дома, замеренная методом «ветровой двери» (Blower Door), изменилась, что привело к дополнительным потерям энергии 4 кВт·ч/м<sup>2</sup> в год.

Стоит отметить, что в первый месяц эксплуатации «Активного дома» работу инженеров усложнила недостаточная развитость инфраструктуры в Подмосковье, в частности проблемы с интернетом. Из-за отсутствия связи не удавалось оперативно и удаленно настраивать различные системы дома. В результате для того, чтобы полностью отладить автоматику и адаптировать ее работу под нужды семьи, понадобилось значительно больше времени, чем для этого закладывалось в расчеты.

«Человеческий фактор внес некоторые коррективы в наши первоначальные расчеты. Кроме того, сама по себе эксплуатация загородного дома значительно отличается от жизни в городской квартире, и если семья до этого не имела опыта проживания в собственном доме, важно информировать его жителей не только о том, как пользоваться системами и оборудованием, но и обучать общим принципам энергосбережения», – комментирует Олег Панитков.

По результатам мониторинга «Активного дома», специалисты «Загородного Проекта» и VELUX пришли к выводу, что расходы на отопление и горячее водоснабжение в нем почти в 11 раз ниже, чем в среднестатистическом доме. По факту расходы в «Активном доме» составляют 20 тыс. рублей в год, в то время как в обычном – 217 тыс. рублей в год. В идеальных же условиях, кото-



рые были изначально приняты для расчетов, экономия была бы еще более значительной – при затратах всего 12,5 тыс. рублей в год.

Также в процессе эксплуатации специалистам удалось развеять ряд мифов. Многие уверены, что большая площадь остекления не подходит для российского климата, является источником теплопотерь и теплового дискомфорта. Однако за счет использования современных светопрозрачных конструкций и южной ориентации окон теплопотери компенсируются за счет поступления солнечной энергии даже зимой. Второй миф – нецелесообразность установки мансардных окон вследствие того, что зимой они покрыты снегом. По факту оказалось, что суммарно в течение всего зимнего периода окна были покрыты снегом около нескольких дней. Снег сходил за счет теплового потока изнутри дома, ветра и солнечной радиации. Ну и наконец, третий миф, который гласит, что в российских условиях невозможно отапливать помещение только с помощью теплого пола. В «Активном доме» теплого пола и продуманной системы вентиляции оказалось вполне достаточно для равномерного распределения тепла и комфортного проживания.

Энергобаланс дома можно смоделировать, он работает в режиме реального времени на сайте «Активного дома» [12].

«По итогам тестирования «Активного дома» сделан ряд выводов и получены новые знания, которые помогут нам как при дальнейшей его эксплуатации, так и при разработке новых проектов. Еще один вывод, который мы сделали – это необходимость более тесного взаимодействия с жителями дома, детального ознакомления их с возможностями оборудования и обучения основам энергосбережения. В целом же проект «Активный дом» можно считать успешным, и мы не планируем останавливаться на достигнутом», – заключил Дмитрий Макаров, руководитель проекта «Активный дом» компании «Загородный Проект».

Таким образом, не только в европейских странах, но и в России появляется все больше реализованных проектов энергоэффективных зданий, демонстрирующих экономическую привлекательность. Особенно интересным будет этот опыт в суровых климатических условиях Урала.

#### Список литературы

1. Габриель И., Ладенер Х. Реконструкция зданий по стандартам энергоэффективного дома: пер. с нем. / науч. ред. д-р. техн. наук, проф. Г. М. Бадьин. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 480 с.
2. Бадьин Г. М. Строительство и реконструкция малоэтажного энергоэффективного дома. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 432 с.
3. Анализ и перспектива развития нормативно-технического обеспечения в области энергетической эффективности / Т. В. Иванов, Ю. А. Табунщиков, А. Л. Наумов, А. К. Джанчарадзе. СПб. : Питер, 2013. 176 с.
4. Модернизация законодательства Европейского союза об охране климата и энергосбережении: сб. науч. тр. / РАН. ИГП. Сектор эколого-правовых исслед.; Центр социал. науч.-информ. исслед.; Отдел правоведения; отв. ред. О. Л. Дубовик, Е. В. Алферова. М. : ИНИОН РАН, 2014. 265 с.
5. Мансардные окна [Электронный ресурс]. URL: <http://www.velux.ru/> (дата обращения 20.11.2014).

6. Проект «Дом А+» [Электронный ресурс]. URL: <http://ekat.ecodolie.ru/proekt/> (дата обращения: 20.11.2014).
7. Институт пассивного дома в России [Электронный ресурс]. URL: <http://www.passiv-rus.ru/> (дата обращения: 20.11.2014).
8. Технологии и расчеты [Электронный ресурс]. URL: <http://ekat.ecodolie.ru/proekt/tekhnologii-i-raschety/> (дата обращения: 20.11.2014).
9. Первый «Активный дом» в России. М. : Загородный проект: VELUX, 2014. 22 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.activedom.ru/> (дата обращения: 20.11.2014).
10. Концепция Active House [Электронный ресурс]. URL: <http://www.activehouse.info/> (дата обращения: 20.10.2014).
11. Визуализатор дневного света [Электронный ресурс]. URL: <http://www.velux.ru/professionals/forarchitects/daylight-visualizer> (дата обращения: 20.10.2014).
12. Энергобаланс «Активного дома» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.activedom.ru/energybalance> (дата обращения: 20.11.2014).

УДК 620.9

Балдин В. Ю., Селезнева И. С.,  
Уральский федеральный университет,  
Gala Ledieu-Poloskova, A.R.I.E.L., Франция  
[v.u.baldin@urfu.ru](mailto:v.u.baldin@urfu.ru), [i.s.selezneva@urfu.ru](mailto:i.s.selezneva@urfu.ru)

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВО ФРАНЦИИ: ОПЫТ A.R.I.E.L. И ВЫСШЕЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ШКОЛЫ ПАРИЖА (MINES-ParisTech)**

Ассоциация A.R.I.E.L. (Association for Research with Industrial and Educational Links) – некоммерческая организация [1], созданная в 2000 г. Конференцией Высших инженерных школ Франции (CGE) [2] для исследования и развития связей между наукой, образованием и промышленностью. Опыт Ассоциации изучался в целях использования международного опыта в образовательной деятельности УралЭНИН, в том числе – в Президентской программе «Энергосбережение, повышение энергетической эффективности и ресурсосбережение в промышленности», реализуемой УрФУ в 2012–2014 гг. [3]

Ассоциация A.R.I.E.L., действуя от имени и по поручению CGE, а также от имени Национальной академии технологий Франции [4], разрабатывает и реализует совместные научно-исследовательские проекты между университетами, высшими инженерными школами и международными партнерами с широким привлечением корпоративного мира и аспирантов при поддержке Министерства иностранных дел, Министерства высшего образования, науки и технологий и Министерства промышленности Франции по различной тематике, в том числе: использование биотоплива и геотермальной энергии, энергоэффективность в городской среде.

Президент Ассоциации – Бернар Сюттер (Bernard Sutter), выпускник Политехнической школы и Высшей национальной школы телекоммуникаций, работал в Министерстве телекоммуникаций Франции, а также сотрудничал с

международными департаментами различных министерств в области промышленности (1953–1976). Спустя год работы в качестве эксперта в Индии возглавил Программу сотрудничества в Латинской Америке, Азии, на Ближнем Востоке, а также в странах Африки, курируя направления промышленной политики и международного сотрудничества.

Его опыт нашел применение в академической научной сфере, а именно в создании двух Высших школ телекоммуникаций в городах Бресте и Эври, объединив их с аналогичным учебным заведением со 100-летней историей, Парижской высшей школой, в рамках Института телекоммуникаций (1976–1983).

С 1984 года он занимается в рамках CGE международным сотрудничеством в областях, объединяющих инженерные науки, исследования, промышленность и высшее образование. Мероприятия, проводимые в сотрудничестве с ассоциацией A.R.I.E.L. с 1999 г., имеют долгую историю, которая начиналась в Беркли и Массачусетском технологическом институте (США), продолжается в Канаде с востока на запад, в Израиле, Корее, Швеции, Мексике, Бразилии, Китае и достигает в 2007 году Восточной Европы – Украины и России.



В офисе Президента Ассоциации A.R.I.E.L. Бернара Сюттера (в центре)

Директор Ассоциации A.R.I.E.L. по России и Украине – Гала Лёдьё-Полоскова (Gala Ledieu-Poloskova) – выпускница Донецкого государственного университета (факультет романо-германской филологии), получила второе образование в Университете Сорбонны по специальности «Экономика». С 1992 г. живёт и работает в Париже. В 1992–1993 гг. – аудитор во французской консалтинговой группе Mazars & Guerard.

С 1993 г. по 2002 г. работала в Отделе трансферта высоких технологий между бывшими республиками СССР, Европой и США (Mazars & Guerard), после чего была независимым консультантом по сотрудничеству с Россией и Украиной. С 2006 г. по 2009 г. являлась вице-президентом французской ассоциации «Французско-Украинские Инновации и Технологический обмен». В 2006 г. Гала Лёдьё-Полоскова начала работу в Ассоциации A.R.I.E.L. в качестве директора по России и Украине, где занимается разработкой совместных инновационных программ, организацией научно-промышленных семинаров в области инженерных наук, связями с политическими и административными структурами. С 1984 г. CGE, а затем Ассоциацией



В офисе Президента Ассоциации A.R.I.E.L. с Галой Лёдьё-Полосковой и Бернаром Сюттером

A.R.I.E.L. запущено 400 проектов, проведено 70 рабочих совещаний и семинаров в ряде стран (США, Канада, Бразилия, Китай, Израиль, Россия, Украина), состоялось 3 симпозиума «Европа-США», к сотрудничеству привлечено 100 высших школ и университетов, 110 французских и иностранных промышленников.

Ассоциация A.R.I.E.L. придерживается следующих принципов:

- нет высшего образования без науки (no higher education without research);
- нет науки без инноваций (no research without innovation);
- нет инноваций без международного вызова (no innovation without international challenge).

Эти принципы графически представлены в виде CGE – ARIEL – The Quadrant (рис. 1) и последовательно реализуются в проектах Ассоциации.

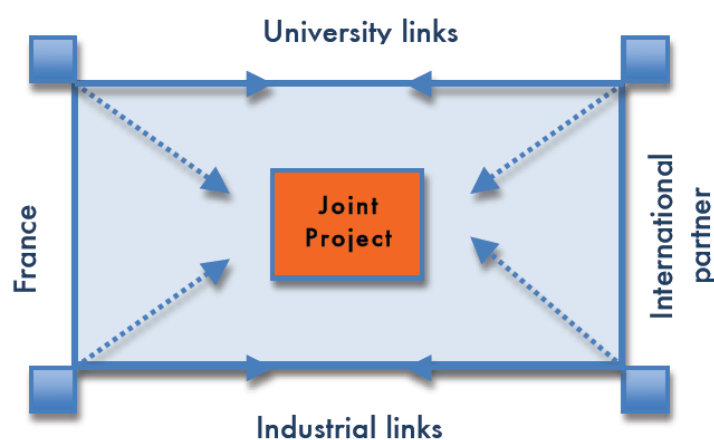


Рис. 1. Схема взаимодействия CGE – ARIEL (Франция) с университетской наукой, образованием, промышленностью и зарубежными партнерами

В 2013 г. были опубликованы результаты исследований, проведенных Marine Agogué, получившей степень доктора наук в Научном центре менеджмента MINES-ParisTech, названных «Сиротливые инновации: Столкновение когнитивных (познавательных) процессов и промышленного развития» (Серия «Экономика и управление») [5], изучавшей в период 2009–2012 гг. различные объекты, в том числе опыт работы Ассоциации A.R.I.E.L.

Одним из крупных проектов Ассоциации последних лет стала российско-французская программа CODEST (Co-Development Science & Technology) [6] совместных исследовательско-инновационных проектов, целью которой является внедрение в межправительственную российско-французскую программу, посвященную вопросам энергоэффективности и начатую в 2007–2010 гг. рядом семинаров в России (в том числе – в Екатеринбурге) и во Франции, креативной составляющей (научная среда) наряду с инвестиционной составляющей (промышленная среда).

Энергоэффективность в зданиях и ее влияние на окружающую среду стало одним из наиболее актуальных общественных вопросов в последние десятилетия. В Европе, во Франции, в России и многих других странах грядущее сокращение запасов ископаемых энергоносителей приводит к необходимости проведения очень жесткой политики в области энергетики и окружающей среды, в центре которой регулярно оказывается строительный сектор. Планируемые к внедрению в Европе меры: новые здания с «нулевым энергопотреблением» к 2020 г. и сокращение в 4 раза энергопотребления строи-



тельного сектора к 2050 г., что законодательно закреплено во Франции в Плате строительства «Гренель» и текущими изменениями к строительным регламентам (RT 2012) [7].

В этом году нам удалось встретиться в Высшей инженерной школе Парижа (MINES-ParisTech), являющейся одним из крупнейших и старейших технических вузов Франции (основанного в 1783 году), с директором Департамента энергетики и процессов Дидье Майером (Didier Mayer).

Дидье Майер является специалистом по инженерной химии, он получил докторскую степень в области энергетической инженерии в Mines-ParisTech в 1987 году защитив диссертацию на тему «Создание запасов термальной солнечной энергии средних температур». В 1991 году стал исполняющим обязанности директора Центра инженерных энергетических исследований при Mines-ParisTech и возглавил это учреждение, расположенное в Софии-Антиполис, на юге Франции.

В течение последних 20 лет занимался развитием исследований в области возобновляемых источников энергии, а именно энергии солнца и ветра. В центре его внимания находится вопрос оптимизации вклада возобновляемых источников энергии в энергообеспечение удаленных сельскохозяйственных районов, а также действующих электросетей. Это включает в себя деятельность в области возобновляемых энергоресурсов, создания запасов энергии, функционирования энергосистем, менеджмента и планирования в области энергетики.

В 2007 году Дидье Майер был назначен на должность директора Центра энергетики и процессов при Высшей инженерной школе Парижа. В 2002–2008 гг. являлся президентом агентства Европейского центра исследований возобновляемой энергии. Это агентство объединяет около 50 наиболее известных исследовательских групп во всей Европе, которые ведут активную работу в области исследования, развития и внедрения всех видов возобновляемых источников энергии и связанных с этим технологий.



У стены здания MINES-ParisTech, выдержавшего обстрел в 1918 г. и сыгравшего важную роль в борьбе за освобождение Парижа 25 августа 1944 г. – в центре Дидье Майер)



Дидье Майер представляет результаты исследований специалистов Mines-ParisTech



В офисе Дидье Майера

Дидье Майер, являясь руководителем с французской стороны программы CODEST, познакомил нас с научной проблематикой лаборатории, которой он руководит, методами и результатами исследований, продемонстрировал современные разработки специалистов MINES-ParisTech в направлении повышения энергетической эффективности и ресурсосбережения (некоторыми слайдами из презентаций [8–10], предоставленных французскими коллегами, иллюстрируется этот материал).

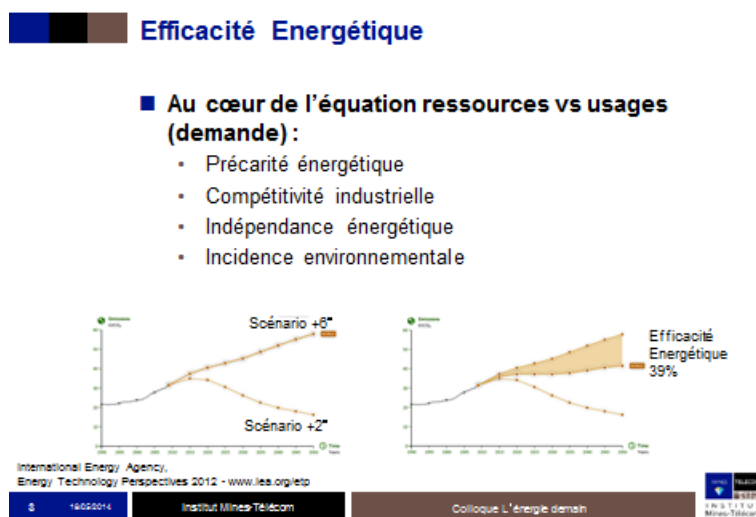


Рис. 2. Сценарии глобального изменения климата Международного энергетического агентства

По мнению французских специалистов, энергоэффективность является центральным фактором в различных аспектах. Повышение энергетической эффективности позволяет напрямую снижать добычу и потребление первичной энергии, необходимых для достижения определенной цели, обеспечивать энергетическую независимость, снижать выбросы  $\text{CO}_2$  и тем

самым уменьшать остроту проблемы изменения климата и глобального повышения температуры. Вклад энергоэффективности является наиболее значительным и оценивается величиной до 39 % в сценариях глобального потепления Международного энергетического агентства (рис. 2).

Были представлены данные исследований в части анализа энергетического баланса различных отраслей экономики Франции. Конечное потребление энергоресурсов транспортом и жилищным сектором в 2011-2012 гг. составляло по 32 %, промышленностью – 21 % (и эта доля снижается, хотя в некоторых отраслях она выше), перерабатывающими отраслями – 12 %, сельским хозяйством – 4 % (рис. 3). При этом потребление различных видов топлива и произведенных энергоресурсов существенно отличается в этих пяти основных секторах экономики.

## Efficacité Energétique

### ■ Usages finaux :

- Transport : 32%
- Résidentiel : 32%
- Industrie : 21%
- Tertiaire : 12 %
- Agriculture : 4%

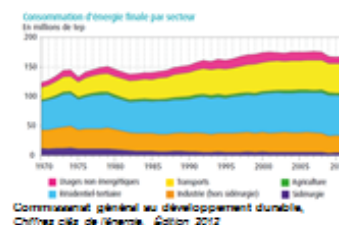
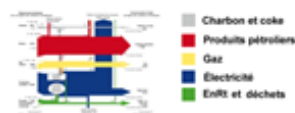


Рис. 3. Конечное потребление энергоресурсов транспортом, жилищным сектором, промышленностью, перерабатывающими отраслями и сельским хозяйством в 2011–2012 гг. во Франции

Для Франции характерно потребление в основном нефти и нефтепродуктов (46 %), природного газа (20 %) и электроэнергии, получаемой преимущественно из ядерной энергии на атомных электростанциях (22 %) (рис. 4).

Это соотношение в структуре энергопотребления является очень нетипичным по сравнению с европейской или глобальной структурами. Особенно низка во Франции доля угольной энергетики, составляющая 3 %.

В то же время доля возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов достигает 9 %, и эта доля растет.

Для глобального производства электроэнергии характерны следующие соотношения: 41 % угля, 6 % нефти, 21 % природного газа, 13 % ядерного топлива, 16 % гидроэнергии.

Анализ возможностей оптимизации энергетического баланса Франции базируется на использовании методов повышения энергоэффективности отрас-

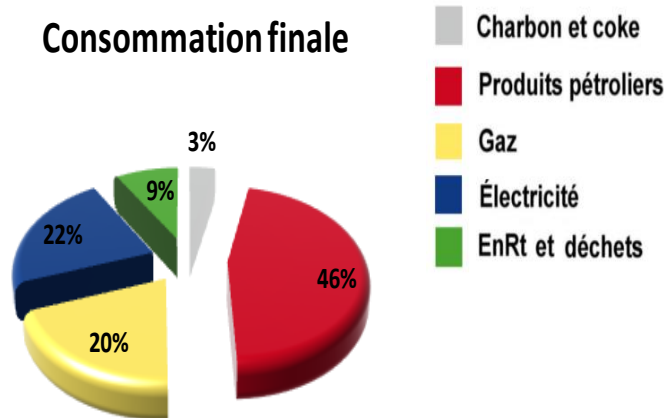


Рис. 4. Структура конечного энергопотребления во Франции по видам первичного топлива и произведенной энергии (уголь и кокс, нефть и нефтепродукты, природный газ, электроэнергия, возобновляемые источники энергии и вторичные энергоресурсы)

лей и отдельных видов производств, типичных для этой европейской страны. Диаграмма Сенки (рис. 5), отражающая структуру конечного энергопотребления и потерь по видам энергоресурсов, показывает возможности совершенствования потребления энергоресурсов за счет повышения эффективности их использования.

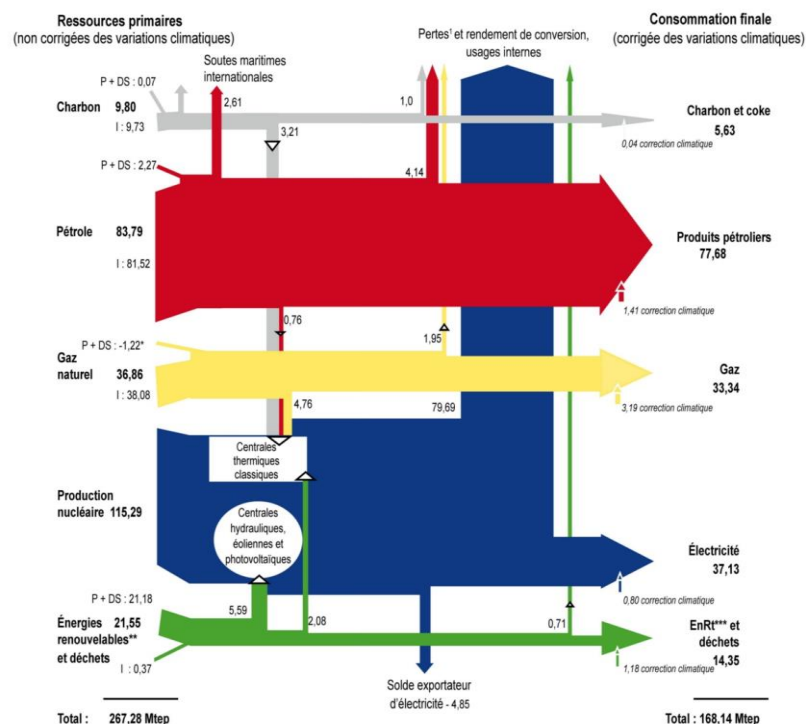


Рис. 5. Структура конечного энергопотребления и потерь по видам энергоресурсов в энергетическом балансе Франции

При этом европейские специалисты придерживаются концепции, состоящей в том, что энергоэффективность является одним из самых прибыльных инструментов повышения надежности энергоснабжения и сокращения выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ.

Рассматривается комплексный подход к проблеме, потребность в энергоэффективных технологиях, которые позволят достичь поставленных целей с использованием результатов фундаментальных и прикладных исследований, осуществлением пилотных проектов в сочетании с внедрением передовых технологий, с учетом различных критериев, в частности степени готовности проектов по девятибалльной шкале, стоимости и приемлемости, связанных с этим рисков, правового регулирования, использования экономических стимулов.

Результаты анализа энергетического баланса и его структуры позволяют специалистам выбрать приоритетные направления повышения энергоэффективности, такие как:

- комбинированный цикл производства электрической и тепловой энергии (когенерация);
- применение тепловых насосов на геотермальной или аэротермической энергии, в том числе, сбросной энергии зданий – использование вторичных



энергетических ресурсов ЖКХ и промышленных предприятий (утилизация теплоты вентиляционного воздуха, теплых стоков, так называемых, «серых» сбросных вод гостиниц и жилых домов, других источников низкопотенциальной теплоты), уже реализованное в двух отелях во Франции;

- совершенствование технологий, оптимизация процессов и оборудования для теплообмена;
- расширение использования возобновляемых источников энергии (биомассы, фотоэлектрических преобразователей, энергии ветра и др.).

Применяемые методы (рис. 6):

- системный анализ технологических процессов в промышленности;
- потребности в различных видах энергетических и других видов ресурсов (топлива, электрической энергии, воздуха, воды), сырья и полупродуктов;
- математическое моделирование и использование методов масштабного перехода;
- изучение отдельных стадий технологических процессов с применением процедур и использованием результатов энергетического обследования (энергоаудита), анализ характеристик оборудования и его соответствия требованиям энергоэффективности.

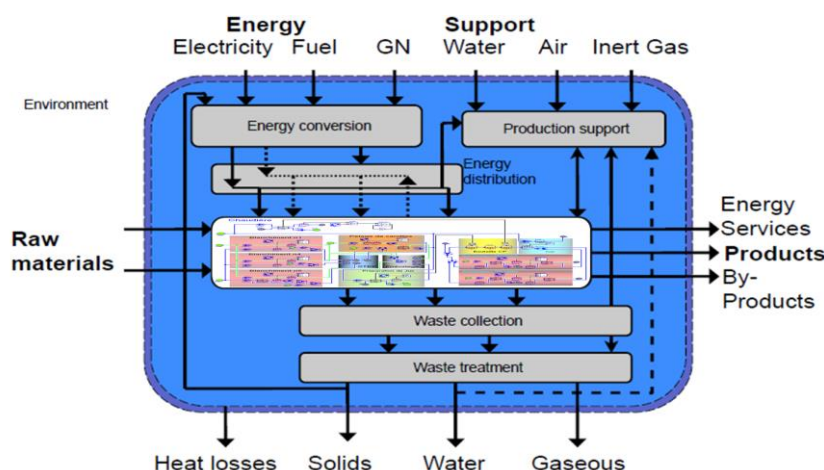


Рис. 6. Пример использования методов системного анализа технологических процессов в промышленности и потребности в различных видах энергетических, а также других видов ресурсов

Сравнение путей совершенствования производства ведется с точки зрения оптимизации потребления энергии, минимизации отходов, с учетом использования побочных продуктов, а также снижения негативного воздействия на окружающую среду. При этом простая экономия или рекуперация энергии не является оптимальным решением. Разработка ведется с учетом анализа влияния встроенных систем, где энергетические потребности подсистемы могут быть обеспечены за счет излишков энергии в других подсистемах (рис. 7).

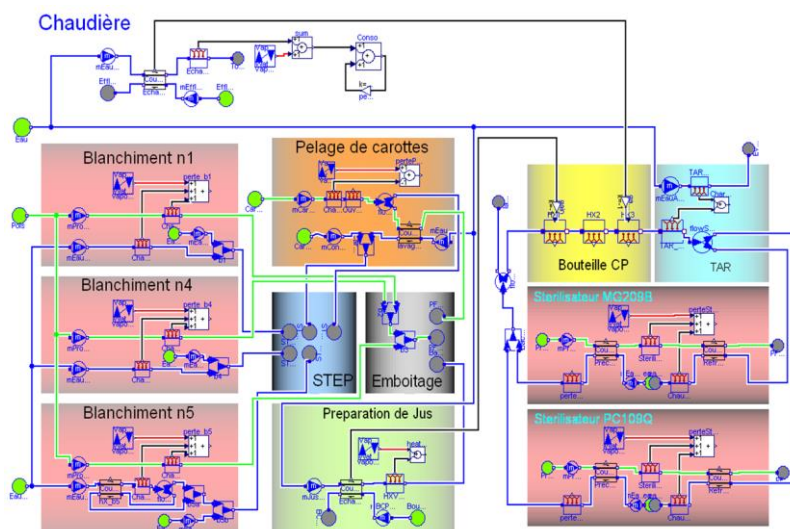


Рис. 7. Пример анализа влияния встроенных систем и подсистем

Симбиоз (взаимодействие и взаимопольное сосуществование) энергетических процессов максимизирует эффективность использования энергии. Промышленная экология является очень хорошим примером симбиоза энергии.

Интеграция энергии (минимальная энергия, необходимая для процесса): любое неэффективное использование энергии приводит к разрушению эксергии (части энергии, равной максимальной полезной работе) и производству *анергии* (не превращаемая в другие виды низкокачественная низкопотенциальная энергия, перешедшая, например, в теплоту окружающей среды) (рис. 8). Энергетический симбиоз позволяет оптимально использовать эксергию.

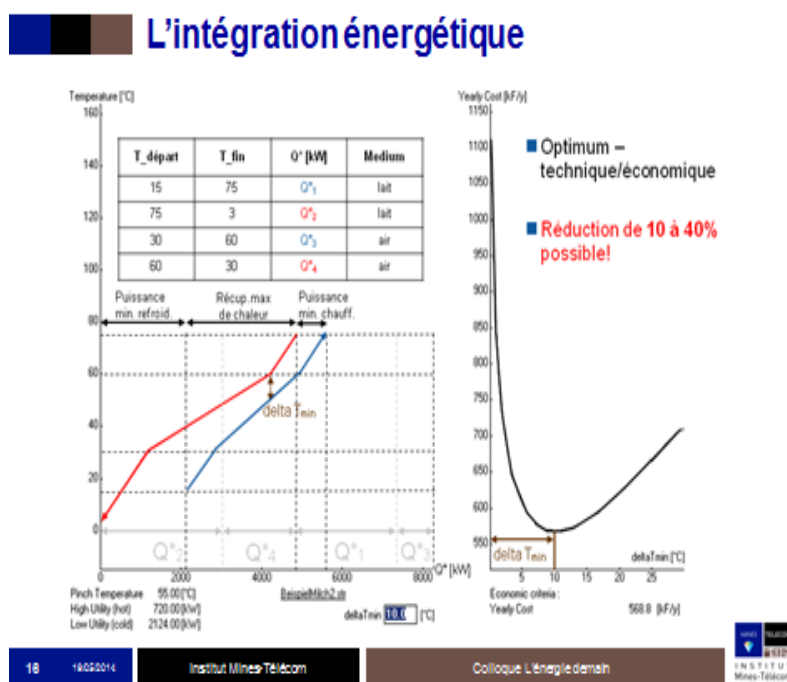


Рис. 8. Интеграция энергии и определение возможного снижения потерь

Применение этих методов позволяет снизить потери энергии на 10–40 %.

Повышение энергоэффективности за счет совершенствования процессов теплообмена и оборудования для тепловых процессов (рис. 9) может быть достигнуто:

- путем ограничения количества материала, необходимого для производства;
- улучшения характеристик трубопроводов (снижения местных сопротивлений и совершенствования структуры течения);
- оптимизации траектории движения потоков;
- совершенствования конструкции теплообменников и применения материалов с особыми свойствами;
- оптимизации распределения потока по сечению аппарата и т. д., выполняемые с использованием специального программного обеспечения.

Применение ультрабыстрых расчетов и оптимизация управления процессами в реальном времени позволяет существенно сократить время воздействия на объекты управления.

Интеграция подходов к использованию энергии (совершенствованию потребления существующей) обеспечивает прирост производства примерно на 20 %.

Методы рекуперации и трансформации теплоты, отработанные и проверенные на лабораторных установках, успешно применяются на промышленных объектах. Например, на газоперекачивающих станциях удается утилизировать в виде механической энергии тепловую энергию природного газа, имеющего температуру менее 120 °С (рис. 10).

При этом очень важным моментом является оптимизация процессов с точки зрения термодинамики.

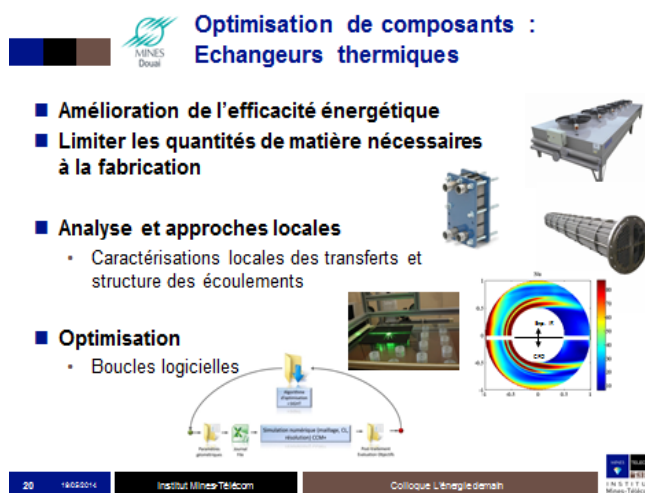


Рис. 9. Совершенствование процессов теплообмена и оборудования для тепловых процессов



Рис. 10. Стенды для изучения возможностей утилизации теплоты при перекачке природного газа

Устранение технологических препятствий – «замков» – осуществляется на уровне академических подходов – преодоления научных «замков» путем максимального сближения фундаментальной и прикладной науки.

В связи с этим в качестве возможных совместных научно-исследовательских работ на экспериментальных установках лаборатории Департамента энергетики и процессов предложен ряд тем, которые будут интересны российским и французским ученым. Конкретные направления исследований и другие аспекты совместной работы, несомненно, требуют детального обсуждения.

Это сотрудничество может осуществляться в рамках упоминавшейся российско-французской программы научно-технологического развития CODEST – Энергоэффективность, организованной и продвигаемой Ассоциацией A.R.I.E.L. совместно с рядом французских (Департамент энергетики и процессов, Центр Энергоэффективности систем Палезо, Высшая инженерная школа Парижа (Mines-ParisTech), ADEME – Агентство по охране окружающей среды и эффективному использованию энергии, Лаборатория инженерных наук в области экологии Университета Ла Рошель) и российских организаций (Российское энергетическое агентство, Московский государственный строительный университет, Союз энергетиков Северо-Запада, Санкт-Петербург) по следующим направлениям:

- Здания и экологические способы строительства
- Промышленные энергоэффективные технологии
- Возобновляемые источники энергии: солнечная, ветровая, геотермальная, биомасса и т. д.;
- CO<sub>2</sub>: улавливание, хранение, утилизация;
- Умное управление энергией;
- Электрические системы;
- Экономические и социальные задачи, охрана окружающей среды.

В качестве первоочередных тем для сотрудничества могут рассматриваться:

- Рекуперация энергии в зданиях;
- Эффективная вентиляция зданий с малой энергоёмкостью;
- Взаимодействие в городских средах;
- Изолирующие материалы, адаптированные к российскому климату – стратегии контроля;
- Рациональное использование энергии – «Умная энергия» в зданиях;
- Использование биомассы;
- Теплообменные процессы и современное оборудование.

Как вариант совместного проекта научного, образовательного и технологического сотрудничества с французской стороной в УрФУ рассматривается разработка программы CODEST-Урал, первыми этапами которой могут стать визиты французских специалистов в УрФУ для проведения широкого круга лекций, семинаров и консультаций для заинтересованных специалистов УралЭНИН, Строительного и других институтов, а также промышленных предприятий и предпринимателей по тематике энергоэффективности, участие

студентов и аспирантов MINES-ParisTech в ежегодных научно-практических конференциях «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», которые традиционно проводятся кафедрами «Энергосбережение» (в настоящее время – «Тепловые электрические станции»), «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», другими кафедрами УралЭНИИ.

#### Список литературы

1. ARIEL: Association for Research with Industrial and Educational Links [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cge.asso.fr/en/about-us/associated-structures/ariel> (дата обращения: 16.10.2014).
2. Conférence des Grandes Écoles (CGE): Excellence for a complex world [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cge.asso.fr> (дата обращения: 16.10.2014).
3. Президентская программа повышения квалификации инженерных кадров [Электронный ресурс]. URL: <http://engineer-cadry.ru/> (дата обращения: 16.10.2014).
4. National Academy of Technologies of France (NATF) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.academie-technologies.fr/> (дата обращения: 16.10.2014).
5. Marine Agogué. L'innovation orpheline. Lutter contre les biais cognitifs dans les dynamiques industrielles. Paris : Presses de Mines, 2013. 229 p. (Collection Économie et Gestion).
6. Российско-французская программа CODEST – Энергоэффективность // А.Р.И.Е.Л. Париж. 2012. 17 янв.
7. Материалы российско-французского семинара «Энергоэффективность в городской среде» / Посольство Франции в Москве, Франко-российский центр по энергоэффективности, ARIEL и др. М., 2010. 10 дек.
8. Didier Mayer. Efficacité énergétique / MINES-ParisTech, Institut Mines-Télécom. 30–31.05.2013.
9. Maroun Nemer. L'usine sobre / MINES-ParisTech, Institut Mines-Télécom. 30–31.05.2013.
10. Bruno Peuportier. Du bâtiment à la ville / Centre d'Efficacité Energétique des Systèmes / MINES ParisTech, Institut Mines-Télécom. 30–31.05.2013.

УДК 621.449

Абдулгужина И. Р., Матвеев С. В., Картавцев С. В.  
Магнитогорский государственный технический университет  
[i.railevna@yandex.ru](mailto:i.railevna@yandex.ru)

### **ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ – ТЕПЛОТА РАЗЛИВАЕМОЙ СТАЛИ В ЗОНЕ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В МНЛЗ**

Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) – теплотехнологический агрегат, выполняющий функцию разливки и формообразования сваренной жидкой стали. В настоящее время порядка 98 % всей производимой стали в мире (свыше 1,4 млрд т/год) разливается в МНЛЗ [1]. Так, для разливки и формообразования стали в МНЛЗ необходимо отводить тепловую энергию в количестве порядка 850 МДж/т, при этом около 700 МДж отводится в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) МНЛЗ. Вся эта энергия отводится в окружающую среду с водой и воздухом на температурном уровне, не превышающем 100 °С. В табли-

це приведены основные параметры разливаемой стали на входе и на выходе стали в (из) ЗВО.

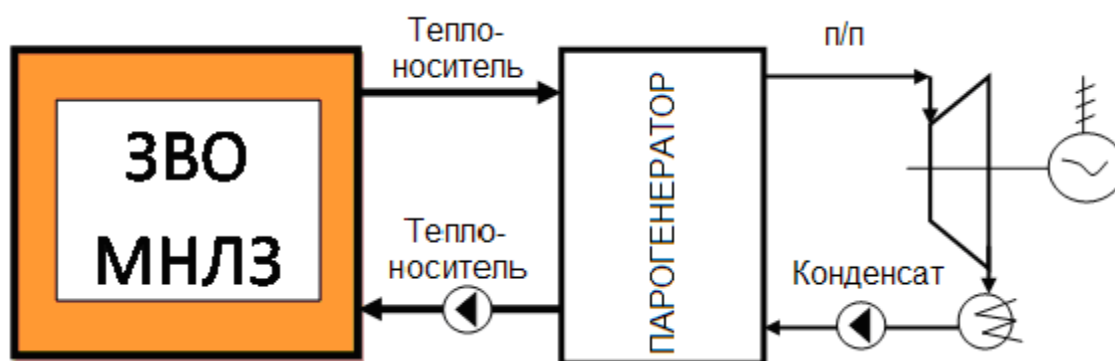
Параметры разливаемой стали

Параметры разливаемой стали	Значение параметров
Температура стали на входе в ЗВО	1400 °С
Температура стали на выходе из ЗВО	800 °С
Скорость вытягивания стального слитка	0,06 м/с

Как видно из таблицы, отводимый в ЗВО теплоноситель имеет высокую температуру. Так, при существующей скорости разливки около 0,06 м/с мощность теплоотвода составляет порядка 84 МВт, что сравнимо с генерируемой мощностью небольшой электростанции; при этом сама МНЛЗ для отвода тепловой энергии от стали в технологическом процессе разливки потребляет порядка 2 кВт·ч на тонну. В связи с тем, что МНЛЗ – источник тепловой энергии высокого потенциала, она еще является потребителем электроэнергии.

В данной работе рассматривается возможность использования теплоты стали в ЗВО в качестве источника генерации электроэнергии.

В промышленности существует несколько возможностей по использованию тепловой энергии для генерации электрической (ПТУ, ГТУ, МГД, термоэлектрические преобразователи и т. д.). Сравнение этих способов между собой позволило выделить традиционные: ПТУ, ГТУ, ПГУ [2]. Поскольку генерация электроэнергии на теплоотводе в 100 °С практически невозможна для предложенных установок, это обстоятельство позволяет сделать вывод о несостоятельности воды в данном случае как теплоносителя. В более ранних работах была рассмотрена возможность использования теплоты разливаемой стали в МНЛЗ с применением высокотемпературных теплоносителей из класса жидкометаллических. Принципиально отличие их от воды: высокая температура кипения при атмосферном давлении и высокая интенсивность теплообмена с охлаждаемой поверхностью. Отвод теплоты от стали в ЗВО МНЛЗ с применением таких теплоносителей может позволить организовать их работу на уровне температур генерации пара в ПТУ ( $\leq 600$  °С). Принципиальная схема такого решения представлена на рисунке.



Принципиальная схема использования теплоты стали в ЗВО МНЛЗ для генерации электроэнергии



Таким образом, организация теплоотвода по представленной принципиальной схеме с применением высокотемпературных теплоносителей позволяет с каждой тонны стали получать с учетом КПД ПТУ 40 % порядка 80 кВт·ч электроэнергии на тонну стали. Возможное количество получаемой электроэнергии превышает собственные нужды самой МНЛЗ (2 кВт·ч на тонну), что открывает возможности внешнего дополнительного использования электроэнергии в соседних цехах металлургического предприятия.

#### Список литературы

1. Исследование возможности полезного использования теплоты стали в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок / И. Р. Абдулгузина, Ю. К. Демин, С. В. Матвеев, С. В. Картавцев. // Энергосбережение – теория и практика: труды Седьмой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов: в 2 т. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. Т. 1. С. 35–36.
2. Петракович М. А., Абдулгузина И. Р., Матвеев С. В. Сравнение способов преобразования тепловой энергии в электрическую // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: материалы 14-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и специалистов. Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2013. С. 28–31

УДК 536.21

Абдуллин Р. Р., Скисов Г. Н., Филипповский Н. Ф.  
Уральский федеральный университет,  
george.skisov@mail.ru

### ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ЕГО ТЕПЛОПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА

В ОАО «Уралэнергоцветмет» разработана конструкция котла-утилизатора для утилизации теплоты отходящих газов за печами Ванюкова. Одним из основных элементов данной конструкции является «огневой» лист (рис. 1), представляющий собой стальную пластину с приваренными к нему охлаждающими испарительными трубами. Отходящие газы имеют температуру около 1300 °С и высокую запыленность, кроме того, в них содержится значительное количество оксидов серы. В состав газа входят 40 % SO<sub>2</sub>, 5 % O<sub>2</sub>. Данная конструкция облегчает очистку теплообменных поверхностей от загрязнений, надёжно защищает поверхности теплообмена от сернокислотной коррозии в период пуска и останова котла.

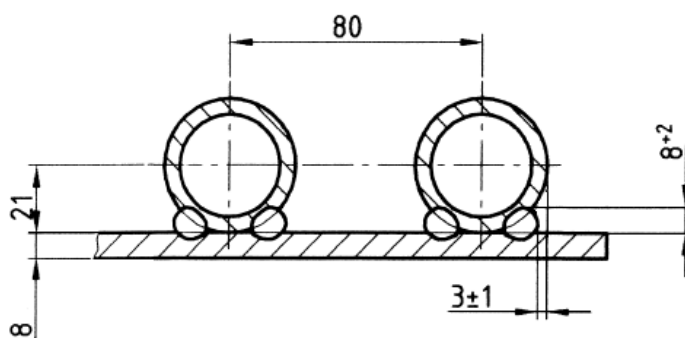


Рис. 1. Профиль огневого листа и приваренных к нему труб. Расчетная схема приварки трубы к огневому листу

Существуют приближенные методы расчета таких систем [1, 2], но все они, кроме ряда упрощений, предполагают, что сварные швы выполнены идеально. Между тем качество и даже методика выполнения сварного шва различны. Для оценки теплопроводящих свойств реальных сварных швов непосредственно из готового котла были вырезаны 3 образца с визуальным различным качеством сварных швов (№ 1, 3, 5). При сварке данного котла была использована упрощенная и менее трудоемкая методика выполнения сварного шва: в корень шва укладывали проволоку  $D = 4$  мм, а затем шов проваривали проволокой СВ-08Г2С диаметром 1,2 мм. Для сравнения были изготовлены 2 образца, проваренные без укладки проволоки в корень шва (№ 2, 4).

Для определения теплопроводящих свойств сварного соединения необходимо организовать и замерить с достаточной точностью тепловой поток через сварной шов. Мощность теплового потока должна быть не меньше, чем в реальном котле-утилизаторе. На основе предварительных расчетов для исследований была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 2), в которой необходимый тепловой поток обеспечивался за счет подвода теплоты к огневому листу от горячей воды с температурой 80–85 °С и отвода теплоты с внутренней стороны трубы к холодной воде с комнатной температурой 11–15 °С. Мощность теплового потока замеряли по тепловому балансу со стороны холодной воды, где потери тепла в окружающую среду были минимальны.

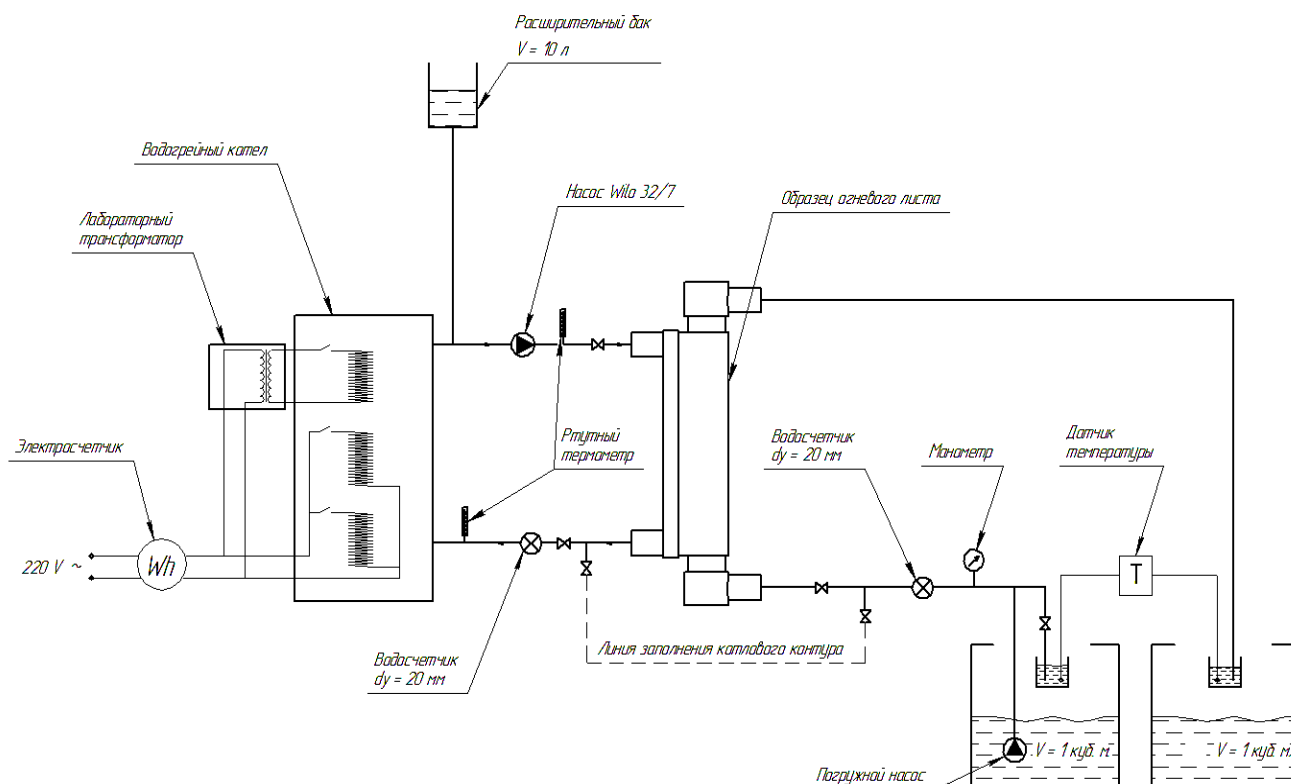


Рис. 2. Экспериментальная установка



Термическое сопротивление теплопередачи  $R_k$  складывается из трех составляющих – термического сопротивления теплопроводности материала теплообменника  $R_\lambda$  и двух термических сопротивлений теплоотдачи между потоками воды и поверхностями теплообменника  $R\alpha_1$  и  $R\alpha_2$  ( $R_k = R_\lambda + R\alpha_1 + R\alpha_2$ ). При поддержании в ходе эксперимента постоянных (одинаковых для всех образцов) температур и скоростей течения горячей и холодной воды термические сопротивления теплоотдачи  $R\alpha_1$  и  $R\alpha_2$  будут одинаковы, и тогда изменение термического сопротивления теплопередачи  $R_k$  будет обусловлено только изменением термического сопротивления материала теплообменника  $R_\lambda$ . Установка была сконструирована и настроена так, что термические сопротивления теплоотдачи  $R\alpha_1$  и  $R\alpha_2$  составляли не более 10 % от величины  $R_k$ .

В результате серии экспериментов были определены средние термические сопротивления теплопередачи образцов  $R_k$  (см. таблицу).

Средние значения термических сопротивлений образцов

Способ изготовления	Образец		Вырезка из котла		
Номер образца	2	4	1	3	5
Среднее термическое сопротивление, (м <sup>2</sup> ·К)/кВт	1,060	0,992	1,633	1,222	1,057

Полученные данные показали, что сварной шов на образцах, вырезанных из котла, существенно неоднороден. Термическое сопротивление сварного шва на одной из представленных вырезок из котла (№ 5) такое же, как и у специально подготовленных образцов.

Следовательно, при качественном выполнении всех сварных швов, даже при изменении технологии сварки, существенных отклонений по термическому сопротивлению не должно было быть.

У двух других вырезок из котла (№ 1 и № 3) термические сопротивления оказались существенно выше. Причина увеличения термического сопротивления связана с ухудшением качества выполнения сварного шва на данных участках огневого листа. Так у образца № 1 высота сварного шва от уровня огневого листа не более 5–6 мм вместо 8+2 мм по проекту.

Исходя из баланса тепла в реально работающем котле утилизаторе, максимальная плотность теплового потока к огневому листу не превышает 50 кВт/м<sup>2</sup>. Температура кипящей воды в трубах 250 °С. При этом максимальная температура огневого листа у хорошо проваренного образца будет примерно 300 °С, у худшего образца – около 330 °С. Обе температуры значительно ниже допустимой рабочей температуры 540–580 °С огневого листа из стали 12Х1МФ. Теоретически возможны условия, когда огневой лист абсолютно чистый без загрязнений. По условиям теплообмена тепловой поток при этом будет 150 кВт/м<sup>2</sup>. Температуры огневого листа в участках с хорошей сваркой будут при этом на уровне 400 °С, а на участках с плохой сваркой близки к 500 °С. Даже в таких практически не реализуемых условиях температуры огневого листа ниже допустимой рабочей температуры стали 12Х1МФ.

Таким образом, при проектировании был заложен избыточный запас по условиям переноса теплоты от огневого листа через сварные швы к кипящей воде в трубах. В данном случае это неплохо, поскольку даже некачественно выполненная сварка не приведет к аварийной ситуации, но избыточный запас всегда связан с удорожанием конструкции. Достаточно было обычного визуального контроля сварного шва для обеспечения одинаково хороших условий передачи тепла по всей поверхности огневого листа, а металлоемкость и стоимость конструкции могли быть существенно снижены.

#### Список литературы

1. Баскаков А. П., Ильина Е. В. Распределение температур по ширине огневого листа (экрана) с приваренными снаружи трубами // Промышленная энергетика. 2002. № 3. С. 41–44.
2. Степин С. М., Мунц В. А. Методика расчета температурного поля огневого листа котлов-утилизаторов // Промышленная энергетика. 2007. № 12. С. 27–29.

УДК 620.9

Аксенов Н. А.  
Уральский государственный университет путей сообщения  
Na\_777@mail.ru

### **РАСЧЕТ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА *SCHNEIDER ELECTRIC***

Для повышения качества выполнения проектов электроснабжения компания *Schneider Electric* разработала программное обеспечение *ID Spec Plus*. Оно было создано специально для инженеров-проектировщиков электриков, выполняющих предпроектную подготовку документации и готовящих спецификации для участия в тендерах [1].

Приступая к работе, рассмотрим некоторые возможности программы. Пользователь должен представлять архитектуру однолинейной схемы, знать некоторые характеристики нагрузок, расположение элементов, информацию о плане проекта и пр. Наличие плана проектируемого объекта в формате *AutoCAD* существенно облегчит работу над проектом (рис. 1).

Выделим основные преимущества программного комплекса:

- 1) экономим до 40 % времени при выполнении стадии «П» проекта системы электроснабжения;
- 2) проводим анализ проектных решений по критерию энергоэффективности и степени воздействия на окружающую среду (выбросы  $\text{CO}_2$ );
- 3) автоматизируем процесс выбора электротехнического оборудования;
- 4) готовим наиболее полную и грамотную спецификацию для участия в тендере;
- 5) повышаем количество проектов, представляемых на тендеры.



Рис. 1. Последовательность выполнения работ

Все это становится возможным за счет:

- разработки однолинейной схемы;
- выбора оборудования;
- подготовки технической документации для проведения тендера;
- анализа электроустановки с точки зрения ее энергоэффективности;
- подготовки спецификации оборудования для оценки бюджета проекта

(эту оценку может представить компания «Шнейдер Электрик»).

С точки зрения научных исследований интерес представляет расчетный модуль, работа которого направлена непосредственно на грамотный выбор оборудования для проекта и отображение его технических характеристик, а также формирование профессионального отчета по проекту [2]. Таким образом, благодаря использованию этого программного продукта основные процессы стадии «П» проекта системы электроснабжения становятся четко структурированными, последовательными и автоматизированными.

Стоит отметить, что с помощью *ID Spec Large* уже выполнен ряд крупных проектов за рубежом и в России. Среди них: проектирование систем электроснабжения завода мощностью 1600 кВА по производству йогуртов *Danone* в Джакарте, торгового центра *IKEA* мощностью 2×1000 кВА в России и многие другие.

Важнейшим достоинством данного программного продукта является анализ эффективности за определенное время (рис. 2).

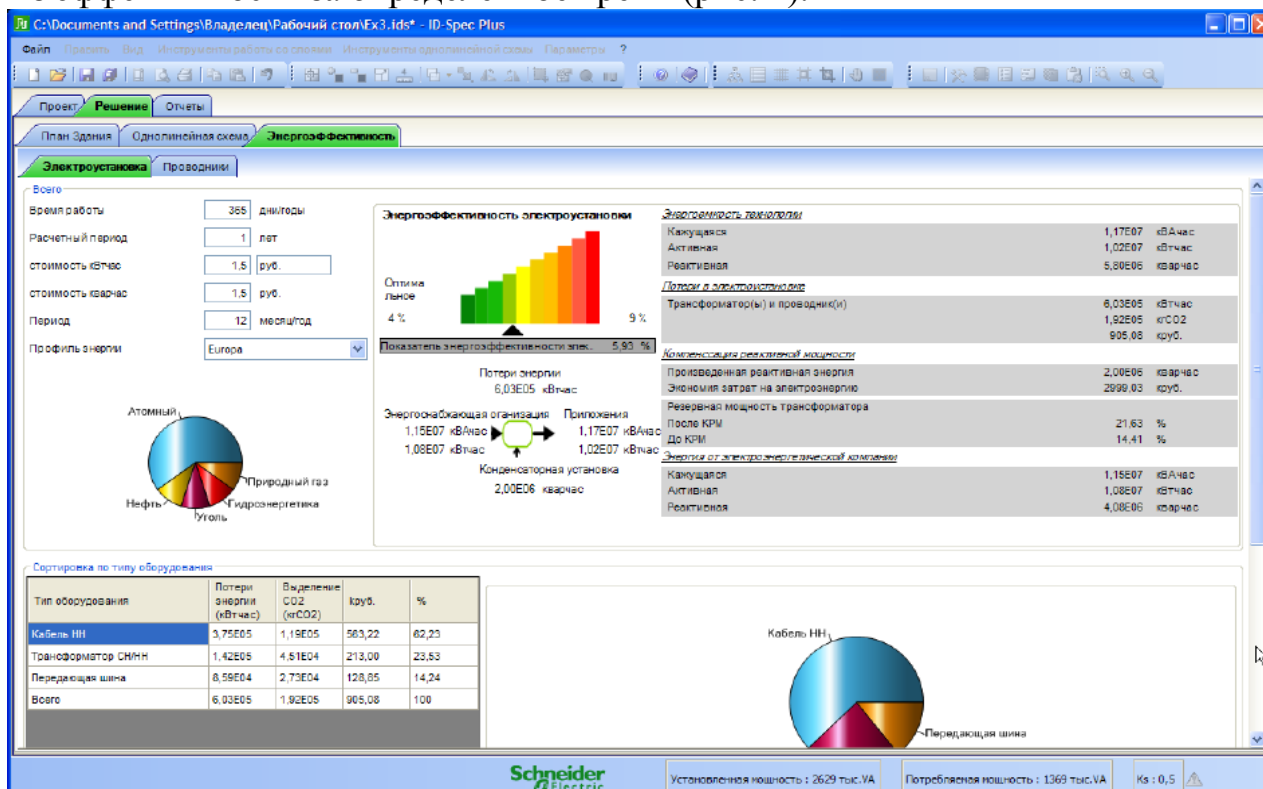


Рис. 2. Результаты расчета энергоэффективности

Программа *ID-Spec Plus* позволяет оценить эксплуатационные затраты на проектируемую электрическую установку за заданное время и высчитывает показатели энергоэффективности (рис. 3).

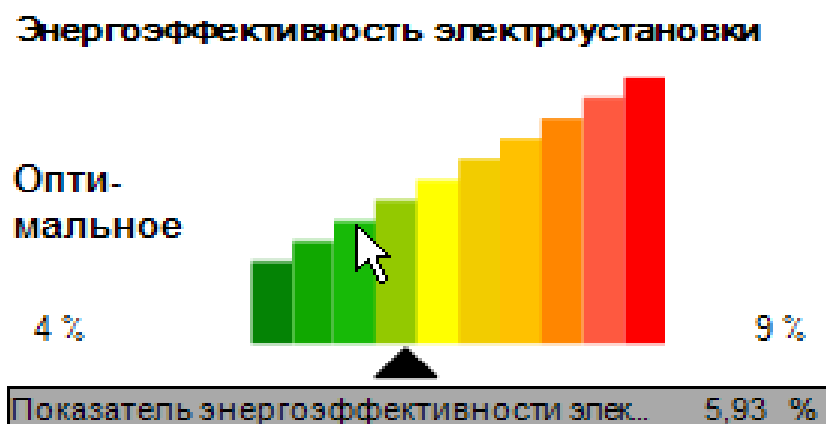


Рис. 3. Показатели энергоэффективности

В результате показатель эффективности (в процентах) равен потерям мощности в установке, поделённым на суммарную мощность, потребляемую установкой (киловатт). Остальными потерями пренебрегают в связи с тем, что потери в проводниках и трансформаторах составляют 90 % от всех потерь в установке.

### Список литературы

1. Материалы официального сайта компании «Шнайдер Электрик» [Электронный ресурс]. URL : <http://www.schneider-electric.ru/documents/software/FAQ1-19.pdf> (дата обращения: 14.11.2014).
2. Энергосбережение в жилищной и коммунальной сфере: учебник для вузов [Гриф УМО] / Л. Н. Чернышов [и др.]; под ред. Л. Н. Чернышова, Т. К. Руткаускас. Екатеринбург : ИРА УТК, 2008. 425 с.

УДК 62-71

Аловадинова Х. Н., Картавец С. В.  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова  
hulkar\_welcome@mail.ru

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ

В мире 96 % стали разливается в машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) [1]. Анализ тепловой работы МНЛЗ показал, что тепловыделение в кристаллизаторе составляет около 16 % от общего потока отводимой теплоты. Вся теплота жидкой стали преобразуется в низкопотенциальную теплоту охлаждающей воды и сбрасывается. Для использования этой теплоты необходимо нагревать охлаждающий теплоноситель до более высокой температуры. Предлагается замена охлаждающей воды на иной теплоноситель, с более широким температурным диапазоном применения. Отобраны теплоносители с температурой кипения не ниже 420 °С (температура рекристаллизации медно-серебряной стенки кристаллизатора) [2].

Наиболее подходящими являются жидкометаллические теплоносители (ЖМТ) Na-K, Li, Na, Pb-Bi. Так, для Na-K в атомной промышленности существуют парогенераторы (ПГ), входящие в состав ядерных энергетических установок (см. таблицу) [3].

Типовые парогенераторы, работающие на ЖМТ

Параметры	БН-600	СВБР-10	ПГН-200М
Паропроизводительность, кг/с	181,5	56	660
Давление пара, МПа	14	4,2	14
Температура теплоносителя на входе, °С	550	480	520
Температура теплоносителя на выходе, °С	380	320	320

Основными требованиями, по которым осуществлялся выбор типа парогенератора, являются высокая надежность, экономичность, безопасность парогенератора и всего производства при контакте теплоносителя с водой.

Принципиальное исполнение данного мероприятия можно описать следующим образом: теплоноситель (например, натрий-калиевая эвтектика) подается в парогенератор с температурой 520 °С. Парогенератор вырабатывает перегретый пар высокого давления при эксплуатации с теплоносителем, который, отработав, охлаждается до температуры 320 °С и вновь поступает в систему

охлаждения кристаллизатора МНЛЗ. Перегретый пар поступает в турбину для выработки электроэнергии [4].

Таким образом, замена теплоносителя в кристаллизаторе МНЛЗ на другой позволяет получить энергосберегающий эффект около 20 %, частично используя теплоту стали в кристаллизаторе МНЛЗ для генерации электроэнергии на собственные нужды предприятия.

Применение подобранных теплоносителей открывает возможность использовать теплоту с высоким потенциалом, что дает существенный энергосберегающий эффект. Например, при объеме выплавки стали в мире порядка 1,5 млрд т в год для конвертерного производства энергосберегающий эффект составит до 247,5 млрд руб.

#### Список литературы

1. Смирнов Н. А. О перспективных направлениях технологического развития металлургии // Электрометаллургия. 2011. № 12. С. 33–35.
2. Влияние замены теплоносителя на тепловой режим стенки кристаллизатора МНЛЗ / Х. Н. Аловадинова, С. В. Матвеев, Е. Г. Нешпоренко, С. В. Картавцев // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : XX Междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп.: тез. докл. : в 4 т. М. : Издательский дом МЭИ, 2014. Т. 3. С. 124.
3. Клименко А. В., Зорин В. М. Тепловые и атомные электростанции: справочник. 4-е изд., стереот. М. : Издательский дом МЭИ, 2007. Кн. 3. 648 с.
4. Рассохин Н. Г. Парогенераторные установки атомных электростанций. М. : Энергоатомиздат, 1987. 384 с.

УДК 621.311.22

Амарская И. Б., Белоусов В. С., Богатова Т. Ф., Рыжков А. Ф., Гордеев С. И.  
Уральский федеральный университет,  
tot@urfu.ru

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРОГАЗОВОГО ЦИКЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СРЕДНЕ- И НИЗКОКАЛОРИЙНОГО ТОПЛИВА

Значительный сектор перспективной угольной энергетики занимают разработки ПГУ с внутрицикловой газификацией угля и сжиганием в камере сгорания ГТУ среднекалорийных и низкокалорийных синтез-газов, горючая часть которых состоит из СО и Н<sub>2</sub> [1].

В процессах сжатия топлива и воздуха в компрессорах и расширения в турбине расходы газов, теплоемкости и показатели адиабаты, от которых зависят удельные работы и количества подведенной в камере сгорания и отведенной в котле-утилизаторе теплоты, различны. Это связано с соотношением количеств двух- и трехатомных газов в продуктах сгорания, а также с тем, что теплоемкости и показатели адиабаты существенно зависят от температуры. На это обстоятельство обращено внимание в [2], где сравнивается термодинамическая эффективность ГТУ на доменном и природном газах, сжигание которых приводит к различному содержанию СО<sub>2</sub> в продуктах сгорания.

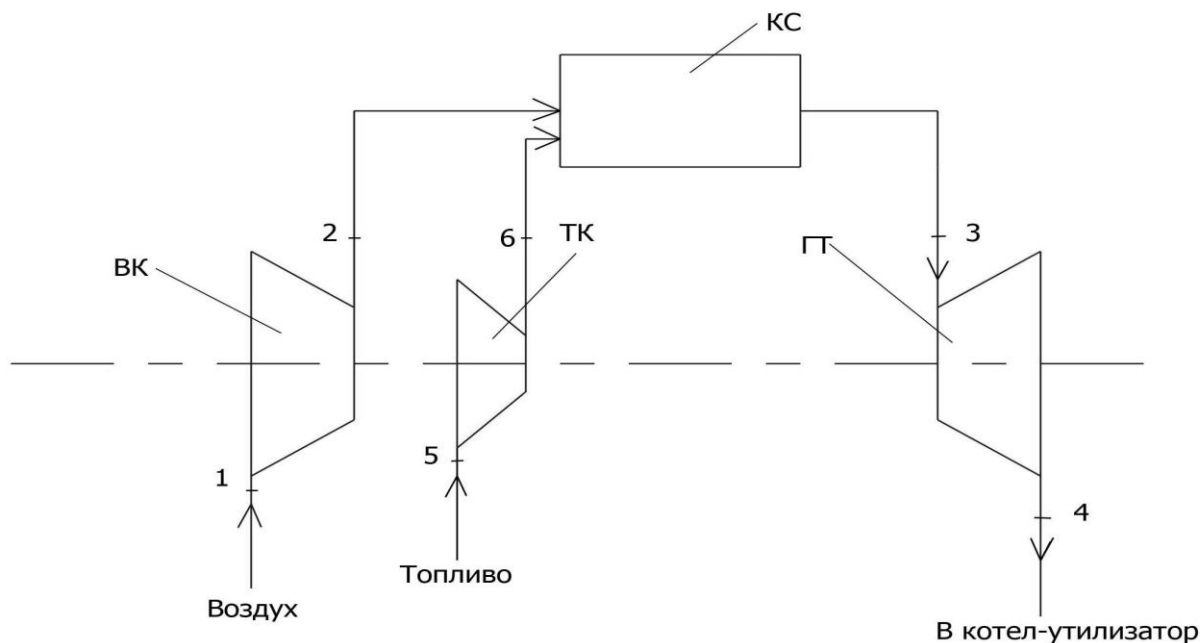


Рис. 1. Упрощенная схема ГТУ:

ВК, ТК – воздушный и топливный (дожимной) компрессоры; ГТ – газовая турбина;  
КС – камера сгорания

Для анализа влияния этих предположений на термодинамическую эффективность парогазового цикла нами была рассмотрена упрощенная схема ГТУ (рис. 1) со следующими допущениями:

- в камере сгорания происходит полное сгорание топлива;
  - учитываются только потери в компрессорах и турбине (внутренние относительные КПД 0,86 и 0,88 соответственно);
  - отсутствуют расходы сжатого воздуха на охлаждение лопаток турбины;
  - КПД паротурбинного цикла принят равным 0,4;
  - молярные теплоемкости и показатели адиабаты не зависят от температуры.
- При расчете степень повышения давления топлива и воздуха принималась равной 20, температура продуктов сгорания перед турбиной 1200 °С.

Источником трехатомных газов в продуктах сгорания служат водород, оксид углерода, метан и углерод. В общем случае в состав топлива эти соединения входят в различных соотношениях. В нашем анализе в качестве топлива рассматривались как предельные случаи (водород, оксид углерода и метан), так и водород и оксид углерода в различных соотношениях с азотом в качестве балластного газа. Состав продуктов сгорания, коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  и расходы воздуха и продуктов сгорания можно определить по заданной температуре газа на выходе из камеры сгорания и тепловому балансу камеры сгорания. Результаты расчета характеристик ПГУ для предельных случаев приведены в таблице. Данные по расходам и мощностям в этой таблице отнесены к единичной мощности (1 МВт) ПГУ.

Как видно из данных таблицы, увеличение КПД ПГУ и уменьшение мощностей связано с увеличением объемной теплотворности топлива; корреля-

ции между содержанием трехатомных газов и характеристиками ПГУ, прежде всего, КПД цикла, как это предполагалось в [2], не существует.

При одинаковой мощности ПГУ наиболее эффективным топливом является природный газ, так как в этом случае минимальны мощности компрессоров и турбины, определяющие габариты компрессоров и турбины, и максимально значение КПД ГТУ.

Характеристики парогазового цикла при использовании в качестве топлива чистых газов

Характеристики	Топливо		
	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>
Низшая теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>	12,6	35,8	10,8
Содержание трехатомных газов в продуктах сгорания, % по объему	8,5	9,1	9,7
Удельные мощности, МВт/МВт:			
топливный компрессор	0,080	0,026	0,094
воздушный компрессор	1,033	1,001	1,031
турбина	1,770	1,698	1,779
газотурбинная установка	0,657	0,670	0,654
паротурбинная установка	0,343	0,330	0,346

При анализе циклов, где в качестве топлива используются водород и оксид углерода в различных соотношениях, оказалось, что КПД ПГУ зависит практически только от соотношения между объемными расходами водорода и оксида углерода,  $\dot{V}_{CO}/\dot{V}_{H_2}$ , и не зависит от объемных долей горючих компонентов. Практически также ведут себя объемный расход продуктов сгорания и мощность турбины, суммарный расход топлива и воздуха в компрессорах и суммарная мощность компрессоров.

От величины объемной доли горючих компонент в топливной смеси при данном соотношении  $\dot{V}_{CO}/\dot{V}_{H_2}$  зависят только расходы и мощности топливного и воздушного компрессоров (рис. 2 для  $\dot{V}_{CO}/\dot{V}_{H_2} = 2$ ).

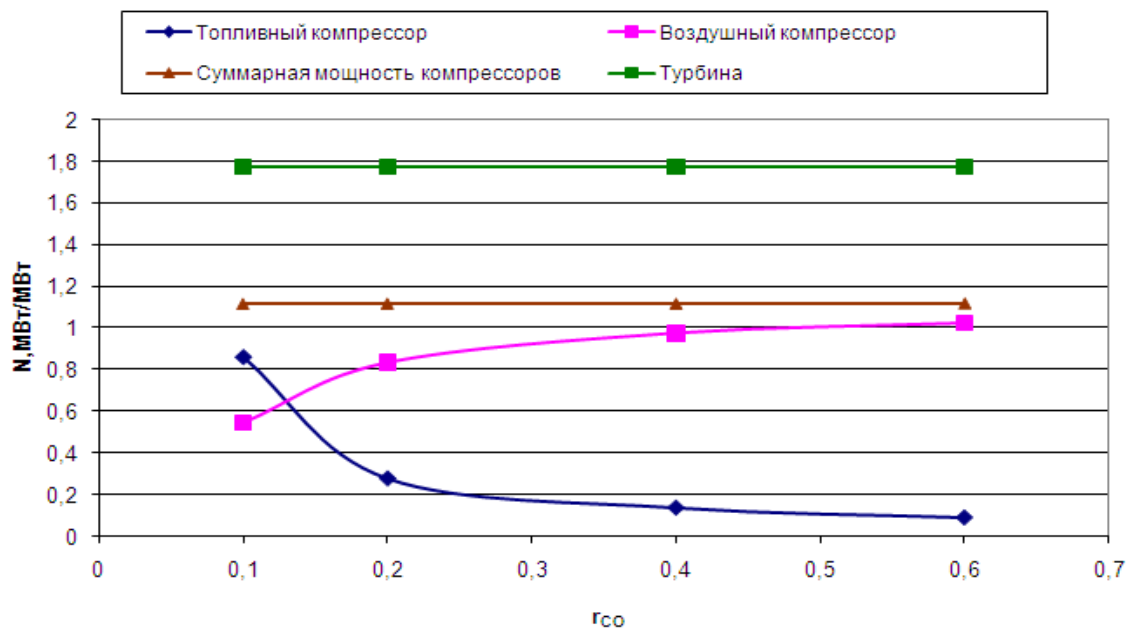


Рис. 2. Зависимость мощностей от объемной доли CO в топливе



В заключение необходимо отметить, что детальный учет потерь энергии, прежде всего потерь на охлаждение турбинных лопаток и тепловых потерь в камере сгорания, не предусмотренный в рамках принятой расчетной модели, а также учет зависимости теплоемкостей от температуры приведет к изменению количественных характеристик полученных результатов, не изменяя качественного анализа.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00524).

#### Список литературы

1. Giuffrida A., Romano M. C., Lozza G. Thermodynamic analysis of air-blown gasification for IGCC applications // Applied Energy. 2011. V. 88. № 511. P. 3949–3958.
2. Design for F Class Blast Furnace Gas Firing 300 MW Gas Turbine Combined Cycle Plant / Toyooki Komori, Hiroyuki Hara, Hisato Arimura, Yohsuke Kitauchi // Proceedings of the International Gas Turbine Congress. Tokyo. 2003. Nov. 2–7.

УДК 536.49

Анисимова О. Ю., Шульц Л. Г.  
Самарский государственный технический университет  
oksanaanisimovaj@gmail.com

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ РАЗОГРЕВА БИТУМА ЭЛЕКТРОНАГРЕВОМ И ГАЗОМ

Самарское предприятие «Ротор» совместно со своими установками для производства асфальта поставляет емкости для хранения битума. При этом обогрев битума этих емкостей возможен как электричеством, так и горячей водой, получаемой в газовом водогрейном котле. Ниже, по заданию предприятия, приведен сравнительный расчет затрат разогрева битума электричеством и газом.

### *Исходные данные*

#### 1. Характеристика емкости для битума:

диаметр внутренний ( $d_{\text{вн}}$ ), м	– 3,2
длина ( $L$ ), м	– 10,72
толщина стенки ( $\delta_{\text{ст}}$ ), м	– 0,006
теплоемкость стали ( $C_{\text{ст}}$ ), кДж/(кг·гр.)	– 0,63
доля объема емкости, занятая битумом ( $r$ )	– 0,8
плотность металла ( $\rho_{\text{м}}$ )	– 7800

2. Характеристика изоляции емкости:	
материал	– маты прошивные
толщина ( $\delta_{из}$ ), м	– 0,1
плотность ( $\rho_{из}$ ), кг/м <sup>3</sup>	– 100
теплопроводность ( $\lambda_{из}$ ), Вт/(м·град)	– 0,036
теплоемкость ( $C_{из}$ ), кДж/(кг·град)	– 0,84
3. Характеристика битума:	
плотность ( $\rho_б$ ), кг/м <sup>3</sup>	– 1500
теплоемкость ( $C_б$ ), кДж/(кг·град)	– 1,9
скрытая теплота плавления битума ( $\mu$ ), кДж/кг	– 126
4. Характеристика природного газа:	
теплота сгорания ( $Q_г$ ), кДж/м <sup>3</sup>	– 33600
стоимость ( $Ц_г$ ), руб./м <sup>3</sup>	– 4,488
5. КПД газового нагрева масла ( $\eta$ )	– 0,8
6. Интервалы температур нагрева битума, °С:	
первый:	
– начальная температура ( $t'_1$ )	– 20
– конечная температура ( $t''_1$ )	– 120
второй:	
– начальная температура ( $t'_2$ )	– 120
– конечная температура ( $t''_2$ )	– 160
7. Время разогрева битума ( $\tau$ ), ч	– 48
8. Расчетная уличная температура ( $t_{ул}$ ), °С	– +20
9. Стоимость электроэнергии ( $Ц_{эл}$ ), руб./(кВт·ч)	– 4,935
10. Число рабочих суток в неделе ( $n$ )	– 7
11. Число часов в сутках ( $m$ )	– 24
12. Коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности емкости окружающему воздуху ( $\alpha_в$ ), Вт/(м <sup>2</sup> ·град)	– 25

### Расчет

Первоначальной задачей расчета является определение общих затрат тепла (кДж) на разогрев всех элементов установки от начальной до конечной температуры. В эти затраты входят:

- нагрев и расплавление битума;
- нагрев металлической емкости;
- нагрев тепловой изоляции.

Количество теплоты, необходимое для разогрева непосредственно битума, кДж:

- в первом интервале температур:  $Q_{б1} = M_б \cdot [\mu + C_б \cdot (t''_1 - t'_1)]$ ;
- во втором интервале температур:  $Q_{б2} = M_б \cdot C_б \cdot (t''_2 - t'_1)$ .

Количество теплоты, необходимое для разогрева непосредственно металлической емкости, кДж:

- в первом интервале температур:  $Q_{е1} = M_е \cdot C_{ст} \cdot (t''_1 - t'_1)$ ;
- во втором интервале температур:  $Q_{е2} = M_е \cdot C_{ст} \cdot (t''_2 - t''_1)$ .

Количество теплоты, необходимое для разогрева тепловой изоляции, кДж:

- в первом интервале температур:  $Q_{из1} = M_{из} \cdot C_{из} \cdot (t_{1из} - t_{ул})$ .

Для всех этих элементов установки затраты теплоты определяются как произведение массы элемента установки на его теплоемкость и разницу температур в конце и начале нагрева. Кроме того, на расплавление битума затраты тепла определяются как произведение массы битума на скрытую теплоту плавления. Масса каждого элемента рассчитывается как произведение объема элемента на его плотность

$$M_e = 3,14 \cdot \rho_m \cdot \delta_{ст} \cdot [(d_{вн} + \delta_{ст}) \cdot L + 2 \cdot (d_{вн} + 2 \cdot \delta_{ст})^2 / 4].$$

$$M_6 = r \cdot V_e \cdot \rho_6.$$

$$M_{из} = 3,14 \cdot \rho_{из} \cdot \delta_{из} \cdot [(d_{вн} + 2 \cdot \delta_{ст} + \delta_{из}) \cdot L + 2 \cdot (d_{вн} + 2 \cdot \delta_{ст} + 2 \cdot \delta_{из})^2 / 4].$$

После определения общих затрат тепла рассчитываются количество электричества (кВт·ч) и объем сгоревшего газа (м<sup>3</sup>), необходимые для получения желаемого тепла.

Электрическая мощность, необходимая для прогрева емкости, кВт:

- в первом интервале температур:  $N_1 = \mathcal{E}_1 / \tau$ ;
- во втором интервале температур:  $N_2 = \mathcal{E}_2 / \tau$ .

Зная стоимость теплоносителей, можно определить затраты разогрева емкости с битумом при использовании соответственно электричества и газа.

Стоимость газового разогрева емкости, руб.:

- в первом интервале температур:  $C_{1г} = V_{г1} \cdot C_{эл}$ ;
- во втором интервале температур:  $C_{2г} = V_{г2} \cdot C_{эл}$ .

Необходимая общая тепловая мощность газового котла, кВт:  $N_k = N_1 / \eta$ .

Часовые потери теплоты (кДж/ч) через тепловую изоляцию емкости рассчитываются согласно уравнению теплопередачи. Температура наружного слоя изоляции после прогрева емкости, °С:

- в конце первого интервала температур:  $t_{1из}^H = t_{ул} + Q_{1из} / (\alpha_v \cdot F_{из} \cdot 3,6)$ ;
- в конце второго интервала температур:  $t_{2из}^H = t_{ул} + Q_{2из} / (\alpha_v \cdot F_{из} \cdot 3,6)$ .

Недельные затраты теплоты определяются как произведение часовых потерь тепла на число часов работы в неделю.

Количество электричества, необходимое для поддержания температуры битума на уровне 120 °С в течение недели, кВт·ч:  $\mathcal{E}_H = Q_H / 3600$ .

Денежные затраты на покрытие потерь тепла определяются через тепловые затраты потерь, стоимость электричества и газа.

Количество газа, необходимого для поддержания температуры битума на уровне 120 °С в течение недели, м<sup>3</sup>:  $V_H = Q_H / (Q_g \cdot \eta)$ .

Стоимость электрического обогрева емкости в течение недели, руб.:

$$C_{Hэл} = \mathcal{E}_H \cdot C_{эл}.$$

Стоимость газового обогрева емкости в течение недели, руб.:  $C_{1г} = V_H \cdot C_g$ .

В результате расчетов затраты на обогрев битума электричеством оказались примерно в 8 раз больше, чем газом.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ РАЗБОРНЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Эффективная работа электрических сетей и электротехнического оборудования во многом зависит от надежности и экономичности многочисленных разборных контактных соединений (РКС), соединяющих отдельные участки электрической цепи [1].

Относительно высокое, часто нестабильное электрическое сопротивление РКС является причиной значительных потерь электроэнергии, недопустимого нагрева и даже обгорания контакт-деталей, нестабильности параметров электрической цепи, что приводит к необходимости частых отключений для ревизии и ремонта этих соединений, то есть к увеличению трудоемкости и стоимости эксплуатационных расходов. Поэтому все исследования в области повышения надежности и экономичности работы РКС направлены на снижение величины и стабилизацию этого сопротивления. Следует отметить, что последние 60–70 лет в этой области не получено никаких новых практических результатов. Кроме традиционных технологий лужения и серебрения рабочих поверхностей контакт-деталей, появились только различные токопроводящие смазки. Однако способы нанесения оловянистых и серебряных металлопокрытий на токопередающие поверхности контакт-деталей РКС (гальваника, горячее лужение, электроискровое или плазменное напыление) связаны либо с применением специального оборудования, либо с нагревом контакт-деталей до температуры 350–400 °С, что исключает возможность их использования в условиях монтажа и эксплуатации на действующем электрооборудовании. Что касается токопроводящих смазок, то, несмотря на простоту и доступность их применения, они могут лишь улучшить стабильность электрического сопротивления РКС, не снижая его величину. Кроме того, смазки, имея в своей основе жидкую фракцию, которая может высыхать или вымораживаться, являются недолговечным защитным покрытием. Поэтому десятки тысяч РКС на линиях электропередач (ЛЭП), контактной сети электрифицированного транспорта, подстанций и распределительных устройств эксплуатируются без всяких защитных металлопокрытий или, в лучшем случае, с применением токопроводящих смазок, которые полностью не решают проблему [2].

В этой ситуации разработка новых защитных металлопокрытий, а также простой и экологически чистой технологии их нанесения на токопередающие поверхности контакт-деталей РКС, которая позволит выполнить эту работу в любых условиях эксплуатации и производства электротехнического оборудо-

вания, всегда была и остается весьма актуальной задачей, направленной на снижение потерь электроэнергии, а также трудоемкости и стоимости эксплуатационных расходов в электроэнергетике.

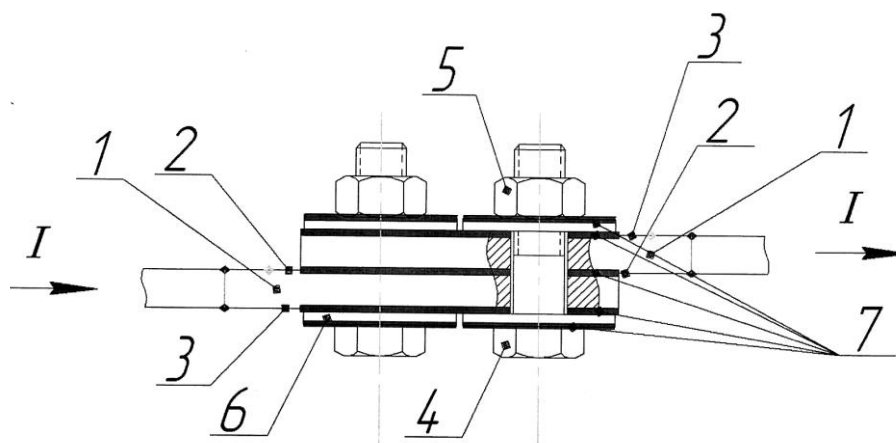
Относительно высокое сопротивление РКС объясняется наличием в нем переходного сопротивления между токопередающими поверхностями контакт-деталей, которое зависит от высокого сопротивления оксидных пленок, покрывающих эти поверхности. Поэтому в практике все способы, уменьшающие сопротивление РКС, направлены либо на механическое разрушение целостности этих пленок путем разработки новых конструкций РКС, либо на замену их пленками, имеющими более высокую удельную электропроводность, путем нанесения на токопередающие поверхности специальных защитных металлопокрытий. Учитывая огромное количество РКС, работающих в электрических сетях, более перспективным является второй способ, который позволяет модернизировать уже работающие РКС без существенных изменений их конструкции [3].

На кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского энергетического института проводятся экспериментальные исследования работы РКС, на базе которых разработан способ нанесения на токопередающие поверхности контакт-деталей защитных металлопокрытий нового типа, которые позволяют в 10–15 раз уменьшить переходное электрическое сопротивление РКС и стабилизировать его величину на уровне первоначальной сборки в течение всего срока эксплуатации.

Новизна способа заключается в том, что для получения металлопокрытий используется металлургический процесс контактного твердожидкого плавления, при котором взаимодействие твердого металла с жидким происходит ниже температуры автономного плавления твердого металла. В результате этого взаимодействия на контактной поверхности образуется пленка металлопокрытия толщиной 5–10 микрон, которая представляет собой твердый раствор двух металлов, т. е. новое вещество, отличающееся по своим физическим и химическим свойствам как от материала контакт-деталей, так и от нанесенного на их поверхность жидкого сплава. Использование в данной технологии поверхностно-активных сплавов на основе галлия, имеющих температуру плавления в диапазоне 15–30 °С, позволяет получить защитное металлопокрытие при температуре нагрева контакт-деталей не выше 40–45 °С. Металлопокрытия могут быть получены на контакт-деталях всех материалов, применяемых для их изготовления (медь, алюминий, сталь и сплавы на их основе), они могут работать в агрессивных средах как внутри помещения, так и на открытом воздухе при температуре от –40 °С до +250 °С [4]. Способ не требует применения какого-либо специального оборудования, кроме набора стандартных инструментов, что делает его технически универсальным, т. е. доступным для применения не только в условиях стационарного производства, но и в реальных условиях работы действующего электротехнического оборудования на различных объектах электроэнергетики. Кроме того, данная технология позволяет в этих условиях отремонтировать РКС с поврежденными или изношенными оловянистыми и серебряными покрытиями.

Способ является экологически чистым, так как само металлопокрытие и галлиевые сплавы, используемые для его получения, химически не активны, не содержат токсичных металлов, а работа по нанесению металлопокрытий не представляет опасности для здоровья производственного персонала и не загрязняет окружающую среду.

Общим недостатком всех РКС является то, что их стальной крепеж (болты, гайки, шайбы) не участвует в процессе передачи тока, так как сталь имеет удельное сопротивление в 9 раз больше, чем медь и алюминий, а поверхности соприкосновения крепежа с контакт-деталью покрыты оксидными пленками, т. е. не имеют электрического контакта. Использование указанного выше способа нанесения металлопокрытий позволило разработать конструкцию РКС с цветным крепежом, у которого электрическое сопротивление уменьшается на 50–70 % [5, 6]. На рисунке показана схема РКС, широко применяемых в силовых электрических цепях.



Разборное контактное соединение

Из рисунка видно, что использование цветного крепежа 4–6 и нанесение на его поверхности, соприкасающиеся с контакт-деталью 1, защитного металлопокрытия 7, которое создает хороший электрический контакт между ними, обеспечивает возможность протекания тока не только через рабочие поверхности контакт-деталей 2–3, но и через детали крепежа.

Характеристики РКС с защитными металлопокрытиями нового типа подтверждены в процессе длительных (10 лет) испытаний как в лабораторных, так и в условиях эксплуатации на отдельных объектах электроэнергетики. На способ нанесения защитных металлопокрытий получены патенты РФ № 2301847 от 01.12.2005 г. и № 141044 от 23.04.2014 г. [7, 8].

На используемые в технологии материалы получены санитарно-эпидемиологическое заключение и технические условия. Эти документы позволяют использовать предложенный способ во всех отраслях промышленной энергетики, на транспорте, в коммунальном хозяйстве и военной технике.

#### Список литературы

1. ГОСТ 14312–79. Контакты электрические. Термины и определения. Введ. 1979-10-23. М. : Издательство стандартов, 1980. 4 с.



2. Дзекцер Н. Н., Авраменко Г. Ю. Энергетическая безопасность и повышение надежности электрических контактов. СПб. : ООО «ИЭЦ-Контакт», 2011.
3. Мышкин Н. К., Браунович М., Кончиц В. В. Электрические контакты. Долгопрудный : ИД «Интеллект», 2008.
4. Справочник по пайке / под ред. И. Е. Петрунина. 3-е изд. М. : Машиностроение, 2003.
5. ГОСТ 10433–82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования. Введ. 1983-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1982. 14 с.
6. ГОСТ 17441–84. Соединения контактные электрические. Приемка и методы испытаний. Введ. 1986-01-01. М. : Изд-во стандартов, 1984. 20 с.
7. Способ нанесения металлического покрытия на токопередающие поверхности разборных контактных соединений: пат. 2301847 РФ / Перельштейн Г. Н., Печеркин А. В., Хронуков С. Г. Опубл. 27.06.2007, Бюл. № 18.
8. Разборное контактное устройство: пат. на полезную модель 141044 РФ / Мухаметов Р. Р., Перельштейн Г. Н., Сарапулов Ф. Н. Опубл. 27.05.2014, Бюл. № 15.

УДК 621.039

Анцупов Г. Н., Засельский В. Е., Сесекин А. Н.  
Уральский федеральный университет,  
sesekin@list.ru

## **ОБ ИНФОРМАЦИОННОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ЗАДАЧИ О ДЕМОНТАЖЕ РАДИАЦИОННО ОПАСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В связи с тем, что на многих атомных электростанциях истек срок эксплуатации реакторов, становится актуальной задача о демонтаже радиационно опасного оборудования. Поэтому возникает необходимость минимизации дозовой нагрузки персонала АЭС при демонтаже оборудования в помещениях с повышенным уровнем радиации. Факторами, влияющими на снижение радиационной нагрузки, являются определение очередности демонтажа оборудования и определение маршрутов перемещения по радиационно опасному объекту. Заметим, что на очередность демонтажа оборудования накладываются некоторые ограничения технологического характера, называемые в теории маршрутизации условиями предшествования. Вычислительные эксперименты показывают, что за счет маршрутной оптимизации возможно снизить дозовую нагрузку на персонал на 20–30 %. Обсуждаемая задача похожа на известную задачу коммивояжера, но, в отличие от нее, «цена» перехода от объекта к объекту зависит от не демонтированных к текущему моменту объектов, которые по-прежнему являются источниками радиации в отличие от демонтированных. Таким образом «цена» перехода от объекта к объекту зависит не только от этих двух объектов, но и от списка невыполненных заданий. Одним из методов, использующихся при решении этой задачи, является метод динамического программирования. Для стандартной задачи коммивояжера он был рассмотрен в [1, 2]. В работе [3] этот метод был распространен на обобщенную задачу коммивояжера в случае, когда функция стоимости зависит от списка невыполненных заданий и на очередность работ наложены условия предшествования.

Для успешной работы метода динамического программирования необходимо информационное обеспечение, позволяющее эффективно строить функцию Беллмана. Необходимой информацией являются значения доз радиации, получаемых персоналом при всех возможных перемещениях и при выполнении демонтажа соответствующего объекта в зависимости от списка недемонтированных объектов. С этой целью разработано программное обеспечение, рассчитывающее отмеченные выше дозы.

Разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять следующие операции, необходимые для получения расчетных матриц, используемых в динамическом программировании:

- ввод исходных данных – физические характеристики объектов (помещения, оборудования и т. п.);
- отображение входных данных на экране в 3D сцене с помощью библиотеки OpenGL;
- разделение конструкций на отдельные объекты, подлежащие демонтажу;
- непосредственный расчет доз облучения на множестве переходов между объектами;
- формирование расчетных матриц, используемых в динамическом программировании.

Тестирование созданного программного обеспечения показало его эффективность.

#### Список литературы

1. Беллман Р. Применение динамического программирования к задаче о коммивояжере // Кибернетический сборник. М. : Мир, 1964. Т. 9. С. 219–228.
2. Беллман Р. Динамическое программирование. М. : Мир, 1960. 200 с.
3. Методы маршрутизации и их приложения в задачах повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных станций / В. В. Коробкин, А. Н. Сесекин, О. Л. Ташлыков, А. Г. Ченцов. М. : Новые технологии, 2012. 233 с.

УДК 621.43

Атаев Т. С., Денисенко В. И., Кычанов М. В.  
Уральский федеральный университет,  
kem\_em@urfu.ru

## ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ЗАКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ

На кафедре электрических машин УрФУ на базе дизельных генераторов защищенного исполнения разрабатывается конструкция генераторов малой и средней мощности закрытого исполнения. С этой целью в конструкцию генератора были внесены некоторые изменения. В качестве возбудителя предлагается использовать защищенную патентом разработку кафедры – совмещенный многофункциональный бесщеточный возбудитель (СМБВ) [1].

В генераторе и системе возбуждения предлагается использовать наноструктурированные изоляционные материалы повышенной теплопроводности.

Такой выбор системы возбуждения и изоляционных материалов позволит увеличить надежность дизельной электростанции, обеспечить полную независимость генератора, в том числе и по питанию канала управления, высокий уровень самодиагностики; обеспечить возможность исполнения во взрыво- и пожаробезопасном исполнении, а также снизить эксплуатационные затраты.

В новой конструкции генератора закрытого исполнения для интенсификации охлаждения применена двухконтурная система с внутренним контуром осевого типа (рис. 1). В новой конструкции вентиляционные каналы [2], обычно размещенные между станиной и сердечником статора с помощью внутренних ребер, вынесены из машины и выполнены в виде труб, приваренных к внешней поверхности корпуса

Характерной особенностью такой конструкции является большая величина гидравлического сопротивления внутреннего контура вентиляции осевого типа.

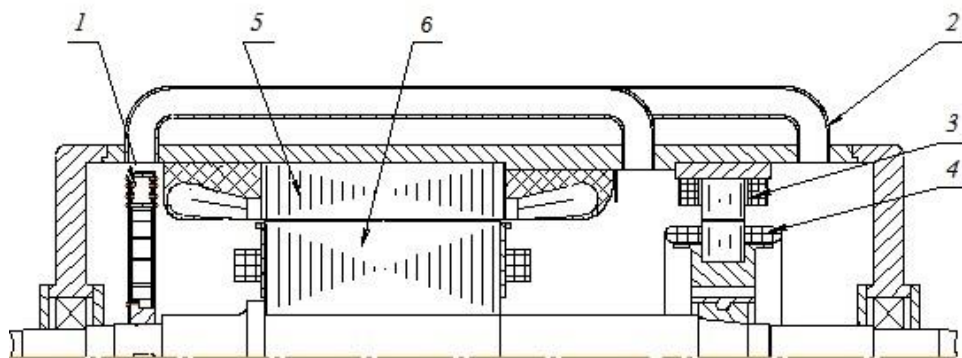


Рис. 1. Конструктивная схема дизельного генератора с бесщеточным возбудителем:  
1 – центробежный вентилятор; 2 – труба охлаждения; 3 – индуктор СМБВ; 4 – якорь СМБВ;  
5 – статор генератора; 6 – индуктор генератора

Было выяснено, что при увеличении расхода только во внутреннем контуре перегрев обмотки возбуждения уменьшается незначительно (в пределах 2–3 °С). Необходимый эффект достигается при условии увеличения расхода воздуха как во внутреннем, так и во внешнем контуре вентиляции. В соответствии с [3] применение вентиляционного узла на основе вентилятора с меридиально-ускоренным потоком позволяет увеличить расход во внешнем контуре в 1,5 раза.

При этом чтобы интенсифицировать теплоперенос из внутреннего контура вентиляции во внешний, необходимо полностью заменить ребра станины на охлаждающие трубы.

Для оценки теплового состояния генератора с возбудителем разработана полная эквивалентная тепловая схема (ЭТС) замещения, реализованная в пакете *MathCAD*. При разработке ЭТС учтены капсулирование лобовых частей обмоток генератора и возбудителя, подогрев воздуха в каналах и охлаждающих трубах.

Изменение перегревов наиболее важных узлов дизельного генератора после применения описанных выше мер показано в таблице. Увеличение числа труб при замене ребер корпуса позволило исключить перекус в перегреве обмоток возбуждения и якоря и снизить перегрев обмотки возбуждения до требуемого уровня.

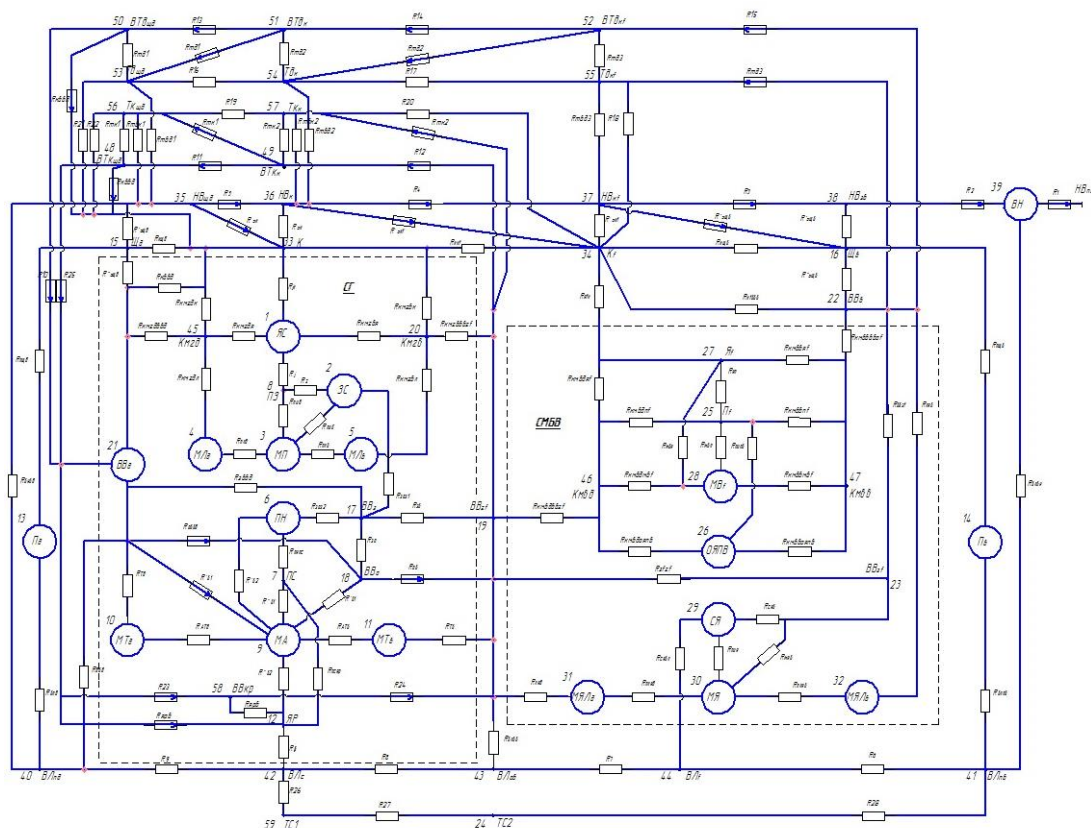


Рис. 2. Эквивалентная тепловая схема замещения дизельного генератора

В результате принятых мер дизель-генераторные установки закрытого исполнения могут быть выполнены в габаритах установок защищенного исполнения при изготовлении обмоток с классом изоляции Н.

Температурное поле дизельного генератора до и после внесения изменений в конструкцию

Номер узла	Обозначение узла	Название узла	Перегрев узла до, °С	Перегрев узла после, °С
3	МП	Медь пазовой части обмотки статора	88,05	107,39
4	МЛд	Лобовая часть обмотки статора, расположенная со стороны приводного дизельного двигателя	103,39	121,85
5	МЛв	Лобовая часть обмотки статора, расположенная со стороны внешнего вентилятора	103,13	121,6
9	МА	Медь аксиальной части обмотки возбуждения	131,9	123,7
26	ОЯПВ	Обмотка якоря подвозбудителя	79,88	77,2
27	Яf	Ярмо индуктора возбудителя	66,83	64,58
28	МВf	Медь обмотки возбуждения возбудителя	81,48	78,75
29	СЯ	Сердечник якоря возбудителя	98,44	96,99
30	МЯ	Медь пазовой части обмотки якоря возбудителя	128,12	126,65
31	МЯЛд	Лобовая часть обмотки якоря возбудителя, расположенная со стороны приводного дизельного двигателя	127,1	125,46
32	МЯЛв	Лобовая часть обмотки якоря возбудителя, расположенная со стороны внешнего вентилятора	127,38	126,06

#### Список литературы

1. Синхронная машина с совмещенным многофункциональным бесщеточным возбудителем: пат. 2095923 RU, МКИ 6 О2 К 19/38, 21/04 / Пластун А. Т., Денисенко В. И., Карташев В. Т., Гольдин Р. Г., Гольмаков Ю. И., Коренцвит Ф. Р., Шелепов А. С. № 9403168; заявл. 29.08.94; Оpubл. 1997, Бюл. № 31. 14 с.
2. Особенности конструкции и вентиляционной системы генераторов закрытого исполнения с применением наноструктурированных изоляционных материалов / М. В. Кычанов, А. Н. Мойсейченков, В. И. Денисенко, А. Т. Пластун, Т. С. Атаев // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докл. 3-й Международной конференции в рамках выставки «Энергосбережение, отопление, вентиляция, водоснабжение», 15–17 мая 2013 г. Екатеринбург : УрФУ, 2013. С. 179–182.
3. Затучная М. А., Пантюхов Л. Л., Федюшкин А. М. Аэродинамические исследования узлов вентиляторов закрытых электродвигателей и методика их вентиляционного расчета // Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. 1976. Вып. 6. С. 27–45.

УДК 621.311.22

Бабенко И. А, Вальцев Н. В.  
Уральский федеральный университет,  
sesohkansty@mail.ru

### МОДЕРНИЗАЦИЯ УГОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ТЭС В БОКСБЕРГЕ

В настоящее время при постоянно ускоряющемся росте производства и потребления вопрос получения большего количества энергии с меньшими затратами является одним из важнейших для благополучия и процветания общества. Большое количество электростанций работают на угле как одном из самых дешевых и имеющемся в большом количестве топливе. Рост выработки электроэнергии обеспечивается не только увеличением общего количества генерирующих мощностей, но и разработкой новых, более эффективных технологий производства. Последнее важно ещё и потому, что позволяет экономить топливо и снижать нагрузку на окружающую среду.

В России, к сожалению, мировые тенденции в энергетике приживаются далеко не сразу, что вызывает некую технологическую отсталость нашей страны и работу по старым принципам. Одним из лидеров в этой отрасли, безусловно, является Германия. Там строятся не только новые электростанции по самым современным технологиям, но и реконструируются и модернизируются старые. В качестве примера рассмотрим электростанцию, работающую под управлением компании *Vattenfall Europe* в г. Боксберге.

Первые агрегаты были введены в работу еще в 1966 г., в дальнейшем к 1980 г. было запущено 14 блоков общей мощностью 3520 МВт. После воссоединения Германии в 1990 г. 12 из них были остановлены (по 210 МВт каждый), а два по 500 МВт (N/P) модернизированы [1]. В середине 90-х был построен новый блок 900 МВт (Q), а в конце 2012 г. запущен блок мощностью

675 МВт (R), их характеристики приведены в таблице. Станция работает на буром угле с теплотой сгорания 8,7–9,1 МДж/кг. В блоке R использованы последние разработки и исследования в области материалов и технологий, он затрачивает на 30 % угля меньше, чем в среднем по стране, планируется достижение результата в 44 %. На рис. 1 указан КПД блока R, а также возможное повышение эффективности пылеугольного цикла с ростом рабочих параметров и переходом к новым материалам.

Параметры энергоблоков электростанции в Боксберге [2]

Параметр/Секция	N/P	Q	R
Наработка, (тыс.) ч	240	100	1,4
Паропроизводительность, т/ч	815	2422	1710
Температура пара (острого/промперегрева), °C	530/540	541/578	600/610
Давление пара, МПа	16,3	25,8	28,5
КПД-нетто, %	35,7	42	43,7
Расход угля на блок, т/ч	560	890	612

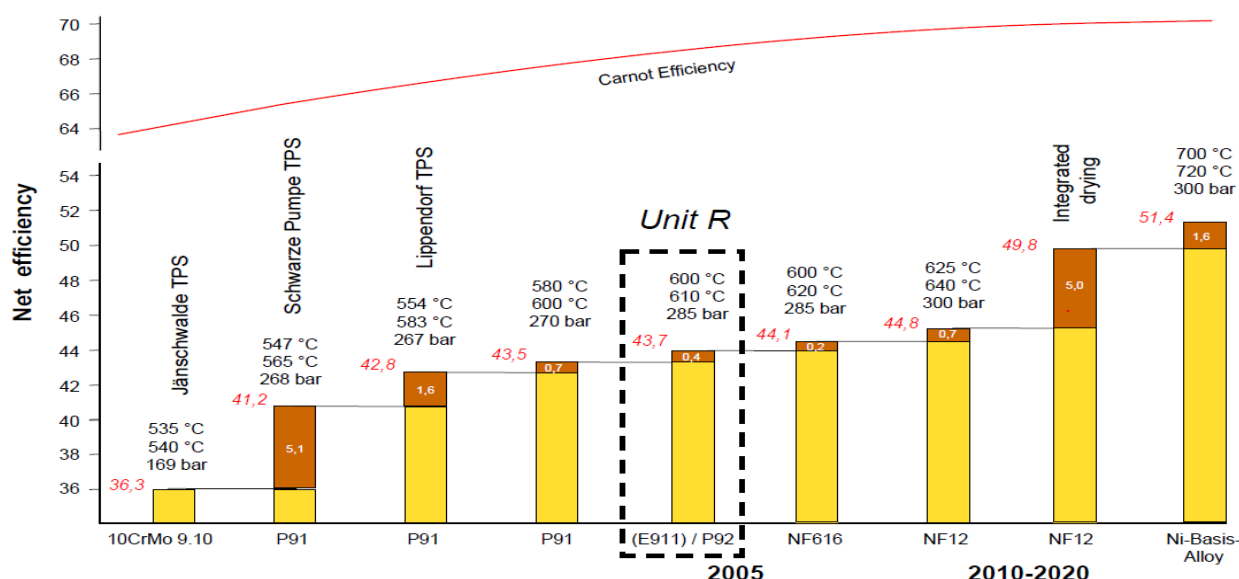


Рис. 1. Эффективность угольных энергоблоков Германии [3]

В целях повышения эффективности работы электростанции и выполнения ужесточающихся требований по выбросам было решено провести модернизацию блоков 500 МВт, которая осуществлялась в 3 этапа: с 1991 по 1996, с 2002 по 2006 и с 2008 по 2014 гг.

На первом этапе была выполнена реконструкция парогенератора, замена части низкого давления турбины, модернизация электрофилтра, установка оборудования для сероочистки и обновлена система управления. На котле были установлены горелки с низкими выбросами  $\text{NO}_x$  и заменены воздушные сопла дожигания. В результате реконструкции снижены температура уходящих газов и потери с механическим недожогом, что позволило повысить КПД котла на 5 %, а энергоблока – на 2 %. За каждым котлом после электрофилтра был установлен десульфурлизатор со сбросом газов через градирню, в результате на



порядок были снижены выбросы  $\text{SO}_2$ , при этом расход электроэнергии на собственные нужды вырос на 2 %, но КПД блока упал всего лишь на 0,7 %. Для увеличения расхода пара, устранения эрозии и повышения эффективности была заменена часть низкого давления. В итоге, КПД турбины повысился на 7 %, энергоблока – на 1,7 %.

На втором этапе была модернизирована система автоматики, а также турбина высокого давления, что позволило увеличить ее эффективность до 89 % и межремонтный период с 4 лет до 100 тыс. ч.

На третьей стадии заменены насосы, в том числе питательные и их приводные турбины, реконструирована система водоподготовки, модернизирован генератор, заменены трансформаторы, электродвигатели 10 кВ и система автоматики. Проведена реконструкция цилиндра среднего давления турбины, которая включала в себя замену ротора и лопаток, уплотнений, модернизацию проточной части [2].

Модернизация блоков 500 МВт ТЭС в Боксберге позволила повысить КПД станции на ~3,5 %, мощность турбоагрегатов возросла на 52 МВт, а расход тепла при этом снизился на 680 кДж/кВт. На рис. 2 можно наблюдать, как изменились выбросы вредных веществ [г/(кВт·ч)], вследствие реконструкции котла и системы газоочистки [2]. Благодаря сделанным усовершенствованиям эксплуатация блоков продлена до 2031 года.



Рис. 2. Сокращение выбросов оксидов азота, серы и твердых частиц в результате модернизации

В рамках программы «чистый уголь» на ТЭС в Боксберге, помимо модернизации устаревших блоков 500 МВт, был построен новый энергоблок 675 МВт с КПД выше 43,7 %, показавший, каких результатов можно достичь при использовании самых современных технологий. Его коэффициент готовности превышает 91 %, диапазон рабочих нагрузок – от 50 до 103 % номинальной мощности. Для обеспечения высокой эксплуатационной надежности энергоблок оснащен самой современной системой контроля и управления. В общей сложности введено в эксплуатацию 10000 взаимосвязанных сигнальных устройств, подключенных к периферийным устройствам системы управления технологическим процессом. Для обеспечения максимальной безопасности

процессов на ежедневной основе автоматически осуществляется проверка состояния металла и сварных швов [4].

Электростанция в Боксберге является хорошим примером того, что из построенной на старых принципах и технологиях ТЭС можно сделать эффективную станцию с высоким КПД и низкими выбросами в атмосферу. Проведение подобных реконструкций устаревших ТЭС в России может стать первым шагом навстречу новой эпохе в области энергетики и дать толчок дальнейшему развитию технологий и созданию новых высокотехнологичных и эффективных электростанций, удовлетворяющих нужды в потреблении энергии при невысоких затратах.

#### Список литературы

1. Vattenfall's Power Plants. Boxberg [Электронный ресурс]. URL: <http://powerplants.vattenfall.com/powerplant/boxberg> (дата обращения: 12.11.2014).
2. Heimann G. Renovation and Modernization of Lignite fired Power Plant Boxberg // 4th EU South Africa Coal and Clean Coal Working Group Meeting. Johannesburg, 5–6 Nov. 2012.
3. Rost R. Clean Coal Technologies on example of Vattenfall's Power Plant Projects BOXBERG unit R and MOORBURG // 9th Meeting of the Task Force on Regional Energy Cooperation in Central and South Asia (RECA). Astana, Kazakhstan, 7 October 2013.
4. Vattenfall Europe Generation AG. Boxberg unit R. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.bea-tdl.de/fileadmin/BEA/referenzen/energietechnik-energieerzeugung/Englisch/6\\_RB\\_Block\\_20R\\_20Boxberg\\_eng.pdf](http://www.bea-tdl.de/fileadmin/BEA/referenzen/energietechnik-energieerzeugung/Englisch/6_RB_Block_20R_20Boxberg_eng.pdf) (дата обращения: 12.11.2014).

УДК 532.1

Бадыкова Л. Н., Зиганшин А. М.  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
amziganshin@kgasu.ru

## ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ В ПЛОСКОМ ПРИТОЧНОМ ТРОЙНИКЕ НА СЛИЯНИЕ

Обычно в системах вентиляции или дымоходов используется такой фасонный элемент, как тройник на приток или на разделение потоков. Для этого случая имеются данные о коэффициенте местного сопротивления [1; 2]. Тем не менее, бывают случаи, в которых приточный тройник работает на слияние – например, случаи параллельной работы двух нагнетателей на одну сеть. Неизвестно, как учитывать возникающие при этом потери. Работа посвящена численному исследованию течения в приточном равностороннем (ширина канала  $b = 0,1$  м) тройнике на слияние. Задача решается в двухмерной постановке, общая система уравнений движения турбулентной жидкости замыкается при помощи универсальной  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности. Для моделирования пограничного слоя используются стандартные пристеночные функции. На рис. 1 приведена геометрия расчетной области и характерные линии тока.  $AB$  и  $EF$ : границы, через которые воздух подается через тройник – граничное условие

равномерной скорости на входе,  $CD$  – выходная граница, остальные границы – непроницаемые стенки. На рисунке видна отрывная зона, образующаяся у острой кромки тройника и являющаяся одной из причин резкого падения давления в данном возмущающем элементе. Длины каналов вверх по течению (ответвления прямое и боковое согласно терминологии [1]) взяты равными  $20b$ , а вниз по течению (слияние) –  $100b$ .

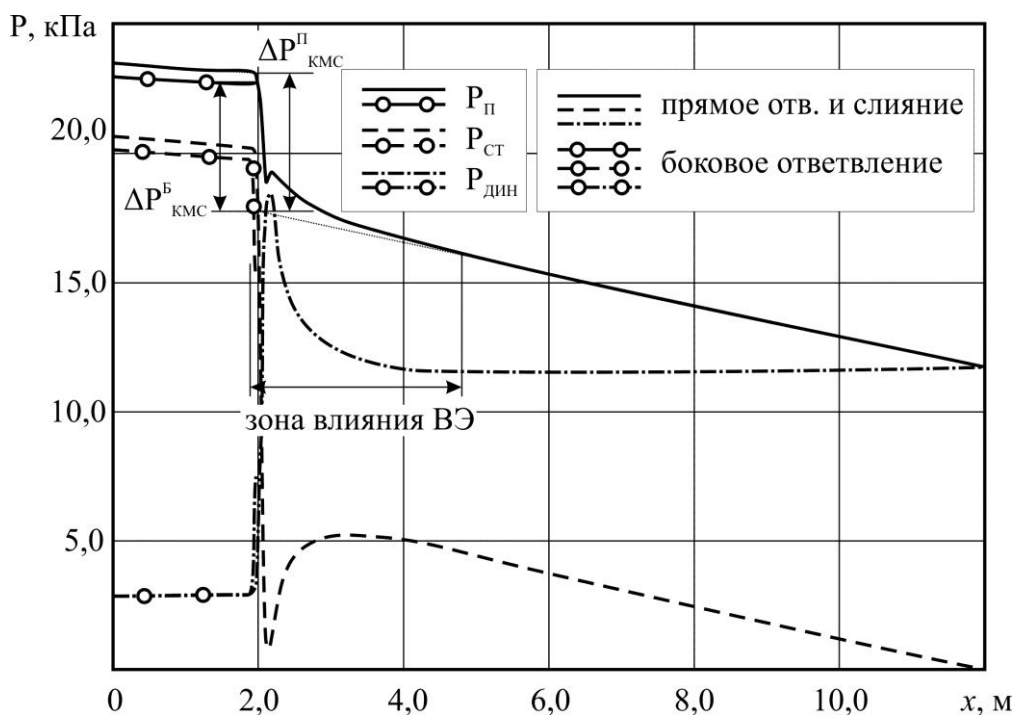


Рис. 1. Геометрия расчетной области и линии тока течения

На первом этапе было проведено исследование на «сеточную зависимость» – решен ряд задач с последовательно измельчаемой сеткой, причем на первых этапах сетка измельчалась во всей области, а затем только возле твердых границ. Такая стратегия измельчения была выбрана, чтобы не только разрешить достаточно мелкой сеткой область основного (ядра) течения, но и с целью правильно смоделировать пограничный слой. При измельчениях контролировались искомые значения КМС на боковом и прямом ответвлениях, безразмерный параметр  $y^*$ , характеризующий качество сетки в пограничном слое (должен быть порядка 30), а также падение давлений полного  $P_p$ , статического  $P_{ст}$  и динамического  $P_{дин}$  по длине канала с тройником.

В результате исследования на «сеточную зависимость» за окончательную принята задача после девяти этапов измельчения. Безразмерный параметр  $y^* \sim 44$ , разница между изменениями давлений по длине канала с тройником для 9-го и 8-го этапов не превысила 0,7 %, а между значениями КМС этих этапов – не более 0,06 %. Минимальный линейный размер ячейки составил около 7 мм, количество расчетных ячеек – 1,8 млн., узлов – 2,4 млн.

Далее на рис. 2 показано изменение давлений по длине канала.

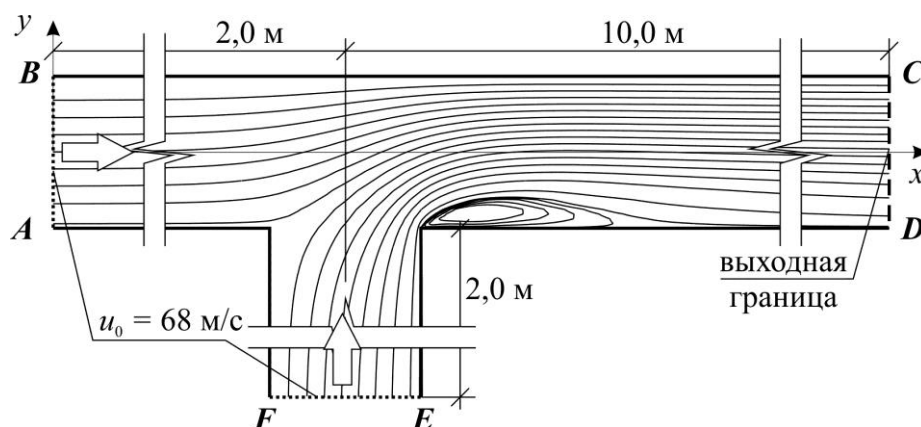


Рис. 2. Изменение давлений по длине канала с тройником

Здесь видно, как области линейного изменения полного давления, в которых потери возникают только за счет трения, так и, так называемую, зону влияния возмущающего элемента (ВЭ) – область резкого падения полного давления в месте установки ВЭ. Видно также, что зона влияния имеет незначительную длину вверх по течению (порядка одного калибра) и в основном распространяется в канале после тройника (порядка 25 калибров).

Значение коэффициента местного сопротивления вычислялось по результатам численного расчета. Первоначально были определены значения среднего удельного падения давления на участках линейного изменения полного давления – в прямом и боковом ответвлениях:  $R_{\Pi} = 165,21 \text{ Па/м}$ ,  $R_{\text{Б}} = 164,38 \text{ Па/м}$ , а также в канале после ВЭ (на слиянии):  $R_{\text{С}} = 624,4 \text{ Па/м}$ . Потери давления на трение при движении воздуха в канале с тройником по прямому ответвлению и далее по каналу составят

$$\Delta P_{\text{тр}}^{\Pi-\text{С}} = R_{\Pi} \cdot l_{\Pi} + R_{\text{С}} \cdot l_{\text{С}} = 165,21 \cdot 2 + 624,4 \cdot 10 = 6574,4 \text{ Па},$$

аналогичные потери при движении с бокового ответвления составят

$$\Delta P_{\text{тр}}^{\text{Б}-\text{С}} = R_{\text{Б}} \cdot l_{\text{Б}} + R_{\text{С}} \cdot l_{\text{С}} = 164,38 \cdot 2 + 624,4 \cdot 10 = 6572,8 \text{ Па}.$$

Тогда значения КМС:

для прямого ответвления

$$\zeta_{\Pi} = \frac{P_{\Pi}^{\text{AB}} - P_{\Pi}^{\text{CD}} - \Delta P_{\text{тр}}^{\Pi-\text{С}}}{P_{\text{дин}}} = \frac{23516,8 - 11639,6 - 6574,4}{11328,8} = 0,468;$$

для бокового ответвления

$$\zeta_{\text{Б}} = \frac{P_{\Pi}^{\text{FE}} - P_{\Pi}^{\text{CD}} - \Delta P_{\text{тр}}^{\text{Б}-\text{С}}}{P_{\text{дин}}} = \frac{22990,2 - 11639,6 - 6572,8}{11328,8} = 0,422.$$

Экспериментальные значения  $\zeta_{\Pi}$  и  $\zeta_{\text{Б}}$  для вытяжных тройников, определенные по [1], составили 0,525 и 0,413 соответственно. Отличие от найденных величин численно не превышает 10 %. Если сравнить численные данные с приточным тройником на разделении согласно [1]:  $\zeta_{\Pi} = 0,55$  и  $\zeta_{\text{Б}} = 1,4$ , то видно, что значения отличаются уже существенно.

Для того чтобы делать вывод о сравнимости КМС для приточного и вытяжного тройника на слияние, нужно провести дальнейшие исследования для других отношений  $G^B/G^C$ .

#### Список литературы

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.
2. Внутренние санитарно-технические устройства: в 3 ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. / Б. В. Баркалов [и др.]; под ред. Н. Н. Павлова и Ю. И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1992. Кн. 2. 416 с.

УДК 621.315.2

Баева И. А., Ковалев А. А.  
Уральский государственный университет путей сообщения  
Irina.baeva.01@mail.ru, kovalev@k66.ru

## ПРОВЕДЕНИЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Многолетний опыт эксплуатации воздушных линий электропередач традиционного исполнения, то есть выполненных неизолированными проводами, показал ряд их существенных недостатков. Появилась необходимость защиты их с помощью самонесущего изолированного провода (СИП).

Средняя повреждаемость линий традиционной конструкции на железобетонных опорах 4–5 повреждений на 100 км в год для неизолированных проводов и 0,9 повреждений на 100 км в год для защищенных проводов.

Достоинств неизолированных проводов много, но можно обосновать необходимость использования и самонесущих изолированных проводов.

В России первые линии с СИП появились еще в 1988 году. В 2003 году в «Правилах устройства электроустановок» (7-е издание) данные линии рекомендованы как основной вариант строительства новых и реконструкции старых ВЛ – 0,4 кВ, а также, в определенных случаях, ВЛ 6–10 кВ. Но лишь через год-полтора основные энергосистемы России начали массовое применение технологии СИП [1]. Основные преимущества СИП приведены в таблице [2].

Основные преимущества воздушной линии с изолированными проводами (ВЛИ)

Преимущества ВЛИ	Чем обусловлены
Высокая электробезопасность	Отсутствие возможности прямого контакта с токопроводящими элементами. Исключение однофазных замыканий на землю. Исключение обрывов проводов при атмосферных воздействиях (гололед, ветровые нагрузки) и падениях деревьев
Высокая эксплуатационная надежность	Исключение коротких замыканий при соприкосновении проводов и контактов с заземленными элементами (строительные механизмы, ветки деревьев)

Преимущества ВЛИ	Чем обусловлены
Снижение трудоемкости при монтаже линий	Простое конструктивное исполнение ВЛИ. Высокая монтажная готовность с учетом применения комплекта арматуры и монтажного инструмента. Увеличение расстояния между опорами
Снижение эксплуатационных затрат	Отсутствие необходимости перемонтажа для устранения увеличения провиса, расчистки трасс, замены изоляторов. Снижение перерывов в обеспечении электроснабжения потребителей. Возможность технического обслуживания и ремонта ВЛИ под напряжением
Уменьшение падения напряжения, снижение потерь электроэнергии	Низкое индуктивное сопротивление (в 2,5–3 раза) по сравнению с традиционными ВЛ

В целом в электрических сетях России смонтировано более 1200 км линий электропередач с проводами СИП-1, 2 и 1600 км ВЛ с проводами СИП-3 преимущественно в таких акционерных обществах, как АО «Мосэнерго», «Коми-энерго», в энергосистемах Северо-Запада России, Урала и Сибири [3].

Последние годы передовые технологии в системе электроснабжения успешно применяются предприятиями газо- и нефтедобывающего комплекса, коммунального хозяйства и на железных дорогах страны.

В 2011 г. завод «Севкабель» изготовил провод с защитной изоляцией для воздушных линий электропередач на напряжение 110 кВ с характеристиками, позволяющими при его применении уменьшить размер охранной зоны по сравнению с размером, установленным для неизолированного провода [4].

В работе дана краткая техническая характеристика СИП. Описаны такие марки проводов, как СИП-1, 2А, 3, 4, 5, 7. Имеются рисунки, наглядно отражающие их конструктивные отличия.

Представлено в виде таблицы технико-экономическое сравнение воздушной линии (ВЛ) и ВЛИ по основным показателям, таким как капитальные вложения на 1 км ВЛ–0,4 кВ и ВЛ–10 кВ, эксплуатационные расходы на 1 км линии, возникновение механических повреждений, реактивного сопротивления, срок службы, отключение потребителей, необходимость подрезки зеленых насаждений при прохождении вблизи них линии.

Для наглядного сравнения капитальных вложений и эксплуатационных затрат приведены графики ВЛ и ВЛИ.

С появлением СИП для 110 кВ появилась необходимость сравнения с неизолированными проводами. Для примера были взяты АС 300-39 и Aero-Z 346–2Z от компании Nexans и проанализированы по основным параметрам. К ним отнесены удельное сопротивление провода, удельная масса, диаметр провода, допустимая рабочая температура, а также сброс налипшего снега.

Сравнительный анализ показывает, что эксплуатационные качества линии с изолированными проводами выше, чем с неизолированными. Большинство ВЛ в настоящее время находится в аварийном состоянии. Для нормальной дальнейшей работы линии необходима полная замена провода. Можно заменить на неизолированные, но целесообразно поменять на более современные и совершенные СИП.



В дальнейшем планируется провести тщательный анализ изолированного провода на 110 кВ.

#### Список литературы

1. Обзор рынка самонесущих изолированных проводов в России и СНГ [Электронный ресурс]. М. : INFOMINE Research Group, 2008. 12 с. URL: [http://www.infomine.ru/files/catalog/288/file\\_288.pdf](http://www.infomine.ru/files/catalog/288/file_288.pdf) (дата обращения: 6.11.2014).
2. Кулешов Д. А., Мальгин В. П. Особенности монтажа самонесущих изолированных и защищенных проводов при строительстве воздушных линий электропередачи 0,38–35 кВ // Электротехнический рынок. 2006. № 3. С. 24–26.
3. Ильмар Ранг. Для энергосистем России // Энергия России. 2000. № 16. С. 3–4.
4. Мариничева О. СИП–7 для воздушных кабельных линий // Энергетика и промышленность России. 2013. № 10 (222).

УДК 621.313.333

Бакубаев Б. Т., Денисенко В. И., Пластун А. Т.  
Уральский федеральный университет,  
[b.bakubaev@yandex.ru](mailto:b.bakubaev@yandex.ru); [kem\\_em@urfu.ru](mailto:kem_em@urfu.ru)

### **РАЗРАБОТКА ВЫСОКОНАДЕЖНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С АСИММЕТРИЧНЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ ДЛЯ ОСОБЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

В России и в мире накоплено достаточное количество радиоактивных отходов, которое необходимо перерабатывать при минимально возможном участии человека. Использование для оборудования по переработке отходов ядерного топлива двигателей общепромышленного применения с органической изоляцией нецелесообразно. Срок службы двигателей общепромышленного применения при работе в радиационной зоне сокращается до 2–3 месяцев, что требует частой замены двигателей и влечет за собой простой основного оборудования. Применение неорганической (керамической) радиационно-стойкой изоляции в серийных двигателях малой и средней мощности стандартной конструкции является невозможным из-за использования всыпной обмотки, которая характеризуется хаотическим расположением проводников в пазу, значительным изгибом провода, перекрещиванием лобовых частей.

Обмотка статора высоконадежного асинхронного двигателя для особых условий эксплуатации должна быть выполнена из сосредоточенных кашек простейшей формы с минимально возможным изгибом при намотке, чтобы исключить повреждение керамической изоляции и иметь возможность последующего ее «лечения». Для этих целей целесообразно применить конструкцию статора асинхронного двигателя с асимметричным магнитопроводом (АДАМ), разработанную коллективом кафедры электрических машин УрФУ совместно с ЗАО «Уралэлектромаш».



Статор опытного образца АДAM,  
разработанного в ЗАО «Уралэлектромаш»

Сердечник статора АДAM (см. рисунок) состоит из шести модулей, число которых равно числу фазных зон. Модуль сердечника статора по длине машины разделен на две равные части с немагнитной прокладкой между ними. Наличие немагнитной прокладки снижает осевую составляющую потока пазового рассеяния. Стяжка сердечника модуля и крепление его половин выполняется с использованием технологических скоб, а также в результате намотки катушки на зубец. Кроме того, стяжка зубцовых накопечников осуществляется с помощью специальных цилиндрических выступов подшипниковых щитов.

Разъем в ярме выполняется на границе фазных зон, что позволяет наматывать катушки на тело зубца и исключить перепад температуры между зубцом и ярмом статора. Для уменьшения величины и влияния стыкового зазора между сердечниками модулей на величину тока холостого хода и рабочие характеристики предварительно выполняют обработку поверхности стыка модулей для удаления гребенки. Для увеличения механической прочности и улучшения охлаждения собранный сердечник статора с обмоткой впрессовывается в корпус на горячую посадку. Наличие стыковых зазоров компенсируется уменьшением рабочего зазора на 0,05–0,1 мм по сравнению с серийными двигателями аналогичной мощности. Уменьшение рабочего воздушного зазора потребовало применения «сквозной» конструкции машины, позволяющей обеспечить минимальные допуски при механической обработке статора и ротора.

Благодаря конструкции сердечника статора АДAM стало возможным применение неорганических изоляционных материалов для обеспечения работы двигателя в особых условиях эксплуатации.

Для обеспечения наилучшего отвода тепла от обмотки и повышения ее влагостойкости все межзубцовое пространство двигателя, а также полости между подшипниковыми щитами и статором, в которых находятся лобовые части, заливаются высокотеплопроводящим компаундом.

Для оценки методики электромагнитного расчета были выполнены расчеты опытного образца новой конструкции асинхронного двигателя с обычной органической изоляцией и проведено сравнение его расчетных и экспериментальных значений рабочих характеристик.

Методика расчета АДAM разработана на основе классической методики электромагнитного расчета асинхронных двигателей общепромышленного исполнения. Особенности конструкции были отражены при расчете магнитной

цепи [1] и тока холостого хода АДAM [2, 3], а также при расчете параметров рассеяния обмотки статора [4]. Расчет рабочих характеристик был выполнен на основе Т-образной схемы замещения асинхронной машины [5].

Проведены испытания опытного образца АДAM мощностью 1,5 кВт с синхронной частотой вращения 3000 об/мин в соответствии с ГОСТом. Результаты испытаний в режимах холостого хода и номинальной нагрузки приведены в табл. 1 и 2. Расчеты характеристик опытного образца выполнены для воздушного зазора 0,5 мм и стыковых зазоров между модулями сердечника статора, равных 0,15 мм, найденных по результатам измерений его магнитной системы. Сравнение показывает, что разработанная методика электромагнитного расчета АДAM дает удовлетворительные результаты и может быть использована при проектировании асинхронных двигателей такой конструкции.

На основе разработанной методики электромагнитного расчета выполнен проект конструкции АДAM с керамической изоляцией. При применении «сквозной» конструкции двигателя, позволяющей выполнить двигатель с зазором 0,2–0,3 мм, и при выполнении стыковых зазоров между модулями сердечника, не превышающих значения 0,05 мм, рабочие характеристики АДAM с керамической изоляцией находятся на уровне их значений в серийных машинах.

Таблица 1

Реальный холостой ход

Данные испытаний	$U_n$ , В	$I_0$ , А	$P_0$ , Вт	$P_{\Sigma 10}$ , Вт	$P_{ст+P_{мех}}$ , Вт	$P_{ст}$ , Вт	$P_{мех}$ , Вт
Опытные	220	3,2	297	144	153	133	20
Расчетные	220	3,2	316	142	175	155	20

АДAM целесообразно использовать в управляемом электроприводе, работающем в тяжелых и экстремальных условиях с длительным сроком эксплуатации, а также для работы в «грязных помещениях» атомных станций.

Таблица 2

Номинальный режим работы

Данные испытаний	$U_n$	$I_{ср}$	$P_1$	$\cos \varphi$	$n$	$P_{\Sigma 1}$	$P_{ст+P_{мех}}$	$P_{\Sigma 2}$	$P_{доб}$	$P_2$	$s$	КПД
	В	А	Вт		об./мин	Вт					%	%
Опытные	220	4,4	2195	0,71	2755	405	153	136	15	1486	8,2	67,8
Расчетные	220	5,2	2193	0,65	2787	382	175	123	11	1502	7,1	68,5

#### Список литературы

1. Бакубаев Б. Т., Денисенко В. И., Пластун А. Т. Особенности конструкции опытного образца асинхронного двигателя с асимметричным магнитопроводом // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии : сб. докл. 3-й Международной конференции в рамках выставки «Энергосбережение, отопление, вентиляция, водоснабжение», 15–17 мая 2013 г. Екатеринбург : УрФУ, 2013. С. 164–167.
2. Расчет магнитной цепи асинхронного двигателя с асимметричным магнитопроводом / А. Т. Пластун, В. И. Денисенко, С. Г. Авдеев, М. В. Мартыненко, И. В. Крупинин // Электрические машины и электромашинные системы : сб. науч. тр. Пермь : Пермский ГТУ, 2003. С. 218–224.

3. Расчет тока холостого хода асинхронного двигателя с асимметричным магнитопроводом / В. И. Денисенко, А. Т. Пластун, П. В. Пупырев [и др.] // Электрические машины и электромашинные системы: сб. науч. тр. Пермь : Пермский ГТУ, 2005. С. 98–103.
4. Denisenko V. I., Pupyrev P. V., Yarovoi A. Yu. Approach to the Leakage Conductance Calculation Method in Asynchronous Motor with Asymmetric Magnetic Core // Proceedings the 10th International Scientific and Practical Conference “Modern Techniques and Technology”. Tomsk : TPU Press, 2004. P. 72–73.
5. Разработка асинхронного двигателя с асимметричным магнитопроводом с керамической изоляцией / Б. Т. Бакубаев, В. И. Денисенко, А. Т. Пластун, В. Е. Недзельский // Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы и компоненты: тр. XV Междунар. конф. МКЭЭЭ-2014, 21–27 сентября 2014 г. Алушта, 2014. С. 149–150.

УДК 621.182.448

Бельченко М. А., Попков Д. В., Лесных А. В.  
Дальневосточный федеральный университет,  
Popkov.d@mail.ru

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА РАЗЛИЧНЫМИ РЕАГЕНТАМИ**

На тепловых электрических станциях, котельных и тепловых пунктах потребителей тепла широко применяется трубчатое водогрейное оборудование, связанное с системами централизованного теплоснабжения: подогреватели сетевой и подпиточной воды на ТЭС и котельных, подогреватели горячего водоснабжения и отопления на тепловых пунктах. В процессе эксплуатации трубки теплообменного оборудования загрязняются с внутренней стороны различного рода отложениями, в том числе железистыми и карбонатными.

Загрязнение теплообменного оборудования влечет за собой:

- снижение тепловой производительности, связанное с падением фактических коэффициентов теплопередачи вследствие роста термического сопротивления трубок;
- увеличение температурных напоров в подогревателях сетевой воды, приводящих к ухудшению энергетических показателей и возможному перерасходу топлива;
- увеличение гидравлического сопротивления в трубках из-за уменьшения их проходного сечения и роста шероховатости.

Главным компонентом отложений в котлах является магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), который формируется как продукт реакции металлического железа с высокотемпературным паром. Другие кристаллические материалы также могут формировать отложения.

Состав котловых отложений:

- ангидрит –  $\text{CaSO}_4$ , арагонит –  $\text{CaCO}_3$ , гидроксид магния –  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , кальцит –  $\text{CaCO}_3$ ;

- гематит (красный железняк) –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , гидроксипатит –  $\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$ , магнетит (магнитный железняк) –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , кварц –  $\text{SiO}_2$ , тринатрит –  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , волластонит –  $\text{CaSiO}_3$ .

Для исследования эффективности удаления отложений с внутренней поверхности труб теплоэнергетического оборудования использовалась лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 1.

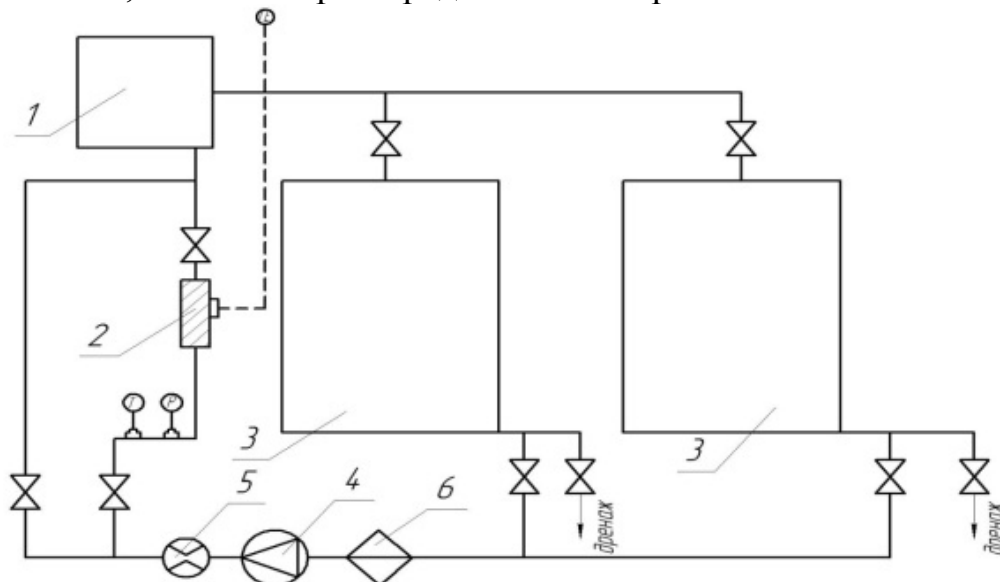


Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования эффективности удаления отложений с внутренней поверхности труб:

1 – электрический нагреватель  $N = 2$  кВт; 2 – экспериментальный образец;  
3 – бак для реагента (2 шт. по 100 л каждый); 4 – циркуляционный насос; 5 – счетчик воды;  
6 – фильтр сетчатый

В процессе отмывки фиксировалась температура реагента внутри бака и на входе в исследуемый образец. Температура наружной стенки исследуемой трубы фиксировалась накладным (контактным) термометром [1].

На данной установке были опробованы нижеследующие моющие составы.

Щавелевая кислота (*этандиовая кислота*)  $\text{HOOC-COOH}$  – двухосновная предельная карбоновая кислота.

Трилон Б (динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты) – белый кристаллический порошок или кристаллы белого цвета.

Смесь щавелевой кислоты с трилоном Б, в отличие от традиционно применяемых для промывки соляной или серной кислоты, оказывает меньшее коррозионное воздействие на металл труб, не требует нейтрализации и обезвреживания сточных вод.

Специальный ремонтно-восстановительный состав (СРВС) – ультрадисперсный порошок; из-за необычных физических и биологических свойств является уникальной композицией, химическая формула которого  $(\text{MgOH})_6\text{Si}_4\text{O}_{11} \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

Препарат Glanz<sup>TM</sup> СНР применяется для предотвращения отложений накипи и инкрустаций в оборотных системах с повышенным содержанием взвешенных веществ, таких как, например, системы обратного водоснабжения

электростанций (как открытого, так и закрытого типов), теплообменное оборудование, котлы, системы отопления.

По результатам исследований в лабораторных условиях труб с различных котлов можно сделать вывод, что наиболее эффективная промывка осуществляется при использовании раствора щавелевой кислоты и трилона Б, а наиболее трудноудаляемыми оказываются кальциевые отложения.

Из результатов проведенных лабораторных исследований моющих составов следует:

- удаление исследуемых типов отложений после 72 часов обработки специальным ремонтно-восстановительным составом не наблюдается;
- при обработке исследуемых образцов раствором щавелевой кислоты с Трилоном Б наблюдается отслоение отложений от стенки трубы;
- воздействие средства Glanz™ СНР на исследуемые типы отложений слабее, чем при обработке раствором щавелевой кислоты с трилоном Б.

Проведен сравнительный анализ эффективности отмытки с использованием специального ремонтно-восстановительного состава, раствора щавелевой кислоты с трилоном Б, моющего технического средства Glanz™ СНР (рис. 2).

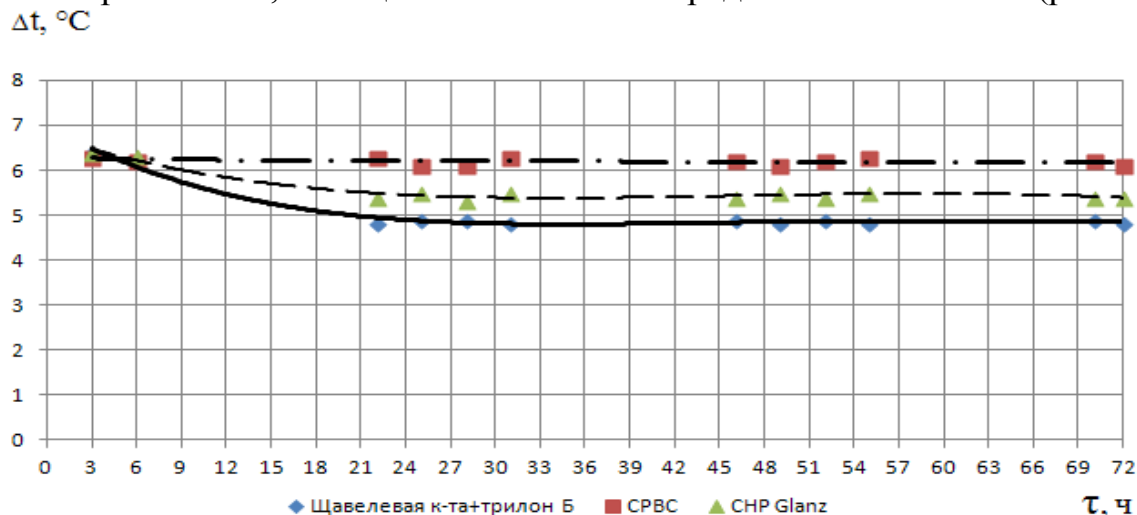


Рис. 2. Динамика изменения температурных напоров при промывке различными реагентами

Из результатов проведенной работы следуют выводы:

- использование в качестве моющего средства раствора щавелевой кислоты с трилоном Б представляет возможность эффективно удалить отложения внутри труб поверхностей нагрева теплоэнергетического оборудования, но не исключает коррозионного повреждения металла;
- моющее техническое средство Glanz™ СНР эффективно при удалении ржавчины, окалина и менее эффективно при удалении большого слоя отложений;
- при испытаниях в лабораторных условиях специальный ремонтно-восстановительный состав не оказывает на отложения видимого воздействия.

#### Список литературы

1. Типовая инструкция по эксплуатационным химическим очисткам водогрейных котлов : РД 34.37.402–96. утв. Департаментом науки и техники РАО «ЕЭС России» 04.01.96 : ввод в действие с 01.10.97. М. : СПО ОРГРЭС, 1997. 28 с.



## **ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕМЕНТА МУЛЬТИЦИКЛОНА ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА НА ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ**

Природные и попутные газы, транспортируемые по магистральным газопроводам, содержат различного рода примеси: песок, сварной шлам, конденсат тяжелых углеводородов, воду, масло. Механические примеси попадают в газопровод как при строительстве, так и при эксплуатации. Наличие механических примесей и конденсата в газе приводит к преждевременному износу трубопровода, запорной арматуры, рабочих колес нагнетателей и, как следствие, к снижению показателей надежности и экономичности работы распределительных компрессорных станций и в целом газопровода.

В настоящее время для очистки газов из механических средств вследствие большой пропускной способности широкое распространение получили батарейные циклоны (мультициклоны). Батарейные циклоны, обладая большой пропускной способностью, могут эффективно осаждают взвешенные частицы среднего (от 10 мкм) и крупного размера, ввиду чего используются для первичной обработки выбросов. На ступени тонкой очистки за ними устанавливают фильтрующие аппараты. Фильтрация в пористом слое представляет собой сложный процесс. Накопление взвеси имеет стохастический характер и вызывает аналогичные изменения структуры, поэтому оптимальные режимы работы действующих фильтров в настоящее время могут быть установлены только опытным путем.

В представленной работе рассматривается возможность создания энергоэффективного устройства, совмещающего обе ступени очистки. Разработан стенд и проведены предварительные испытания [1]. Переоборудование серийного циклона предложенным способом позволяет увеличить скорость обработки потока с 3,5 до 20 м/с и довести диаметр частиц, улавливаемых на 50 %, до 0,4 мкм. Дальнейшее совершенствование конструкции проводится на основе численного моделирования методами вычислительной гидродинамики.

Построена численная 3d-модель циклона ЦН-15 dy 500 мм. В соответствии с рекомендациями [2, 3] принята модель осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation, RANS) при исходном ламинарном течении. Использование осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса требует намного меньших вычислительных ресурсов по сравнению с другими моделями. В рамках RANS моделируется вклад в среднее движение всех масштабов турбулентности. Для определения скорости

и давления потока по сечениям циклона проведены расчеты при входной скорости потока от 3,5 до 20 м/с. Снижение скорости происходит около стенок циклона. Максимум значения скорости наблюдается на выходном сечении. На рис. 1 представлены эпюры скорости и давления в продольном сечении модели при скорости 3,5 м/с и показаны расположения поперечных сечений.

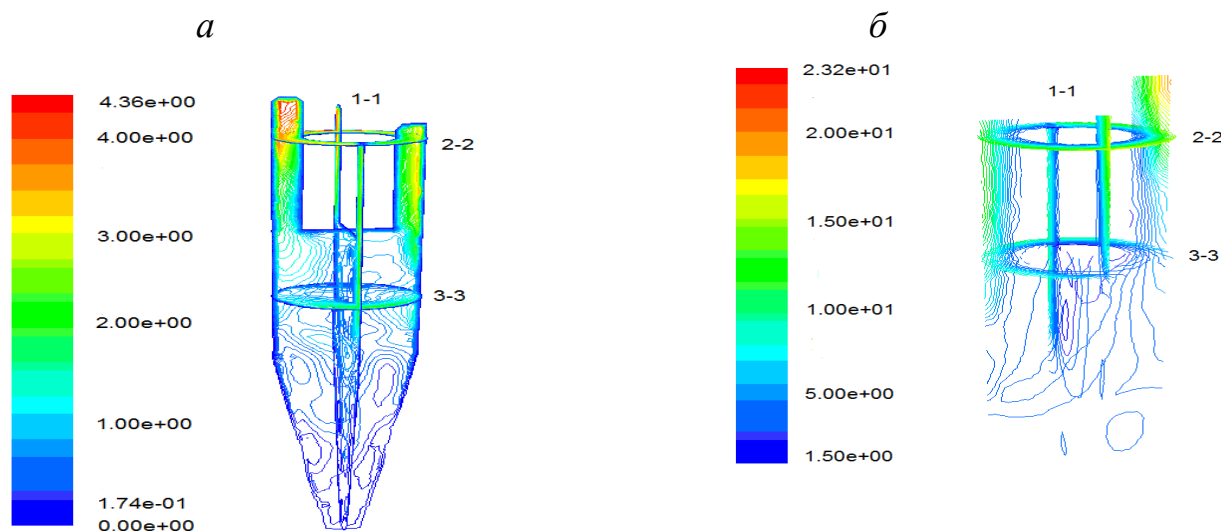


Рис. 1. Распределение скорости потока (а) и давления (б), в пределах кольцевой зоны в продольном сечении циклона 1-1; 2-2 – поперечное сечение на входе циклона; 3-3 – поперечное сечение на выходе потока из кольцевой зоны циклона

После тангенциального входа поток газа приобретает в корпусе циклона осесимметричное винтовое движение вниз. После кольцевой зоны вертикальная составляющая скорости потока вблизи стенки корпуса при перемещении вниз начинает уменьшаться из-за роста давления в сужающейся конической части циклона, конической формы канала.

На рис. 2 показаны изобарические поверхности на входе в кольцевую зону (сечение 2-2) и на выходе из нее (сечение 3-3).

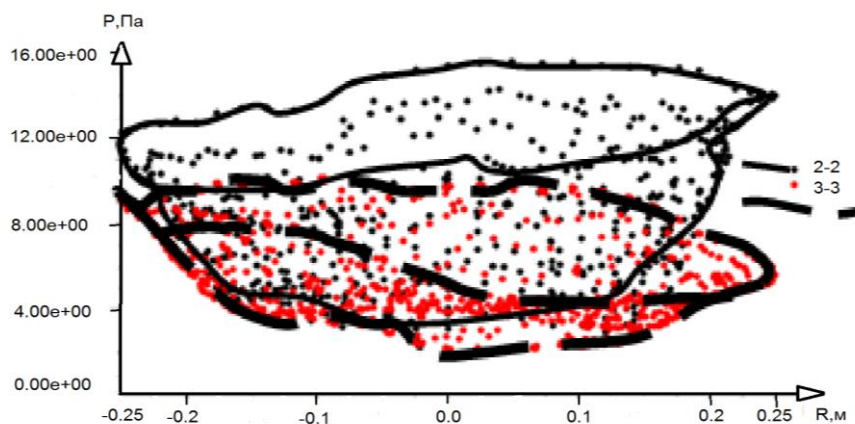


Рис. 2. Распределение давления на входе (сечение 1-1) и выходе (сечение 2-2) кольцевой зоны циклона

Наблюдается снижение давления в выходном сечении по сравнению с входным в среднем на 10–12 Па.

В численном эксперименте исследовался возвратно-поточный элемент мультициклона диаметром 500 мм. На рис. 3 показана возможная компоновка мультициклона, состоящего из 9 элементов диаметром 160 мм [4].

Одиночные циклоны в первом ряду имеют самые длинные выходные трубы, но имеют короткий отрезок к входному отверстию мультициклона.

Циклоны последнего ряда имеют короткие выходные трубы, но большее расстояние до входного отверстия мультициклона.

В результате такой компоновки уменьшается размер входного отверстия мультициклона, уравнивается падение давления по элементам и уменьшаются перебросы пыли, что приводит к более ровной работе всего мультициклона. Такой же принцип уравнивания перепадов давления по элементам мультициклона может быть применен и для элементов диаметром 500 мм.

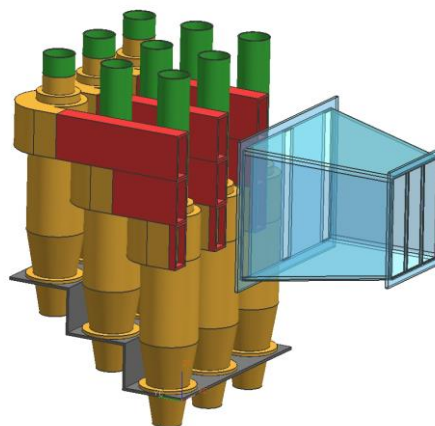


Рис. 3. Мультициклон

#### Список литературы

1. Испытание и моделирование циклонного фильтра / М. Г. Зиганшин, А. М. Зиганшин, Г. И. Гилязтдинова, А. Т. Гильмутдинова // Инженерные системы 2010 : труды Международной научно-практической конференции. М. : РУДН, 2010. С. 263–266.
2. Schmidt S., Blackburn H. M., Rudman M. and Sutalo I. // 3rd Int. Conf. on CFD. Melbourne, Australia, 2003. С. 9–68.
3. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. 508 с.
4. Rob van Benthum. Investigation towards the efficiency of a multi-cyclone dust separator in biomass combustion. E. : Eindhoven, 2007. P. 1–57.

УДК 621.311.22

Бобич А. А.  
Белорусский национальный технический университет (г. Минск)  
bobichsas@mail.ru

## ИНТЕНСИВНОЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ НА ТЭЦ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА ПАРОГАЗОВУЮ ТЕХНОЛОГИЮ

В приходной части энергобаланса Республики Беларусь природный газ доминирует, его удельный вес занимает чуть меньше 70 %.

Высокая степень износа основных производственных фондов электроэнергетики (около 60 %), сложившаяся возрастная структура турбинного оборудования ТЭС обуславливают необходимость скорейшей замены или реконструкции существующих генерирующих мощностей [1]. Все существующее паросиловые ТЭС на природном газе подлежат замене или реконструкции с переводом их на современные парогазовые и газотурбинные технологии.

Применение энергетических установок комбинированного цикла является основой энергетики третьего тысячелетия [2], поэтому внедрению ПГУ уделяется большое внимание на протяжении последних 20–30 лет, и в ближайшие годы они останутся доминирующими в мировой энергетике [3]. По различным оценкам в обозримом будущем доля ПГУ в мировой генерации электроэнергии составит до 49 % [4], поэтому одним из современных основных направлений технического перевооружения паротурбинных тепловых электростанций является их интеграция с газовыми двигателями внутреннего сгорания, как поршневыми, так и газотурбинными, при этом наибольший эффект достигается при модернизации теплоэлектроцентралей [5–9].

При больших мощностях единичных установок, характерных для паротурбинных теплоэлектроцентралей, имеющих высокие начальные параметры, для перехода к парогазовой технологии наиболее целесообразна интеграция с ГТУ. В связи с их модернизацией следует ожидать увеличения мощностей и выработки электроэнергии на ТЭЦ. КЭС на органическом топливе будут замещаться генерацией АЭС, вырастет доля распределенных источников (когенерационных и нетрадиционных), а также ГЭС. Генерации КЭС на органическом топливе не останется основной у потребителей, что поднимает остроту и определяет по-новому вопрос об обеспечении неравномерности графика нагрузок. Регулирование генерации рассматривается многими авторами, предлагаются различные способы [10]. Их объединяет, прежде всего то, что эффективность производства электроэнергии как энергетическая, так и экономическая оказываются невысокими. Неоправданно игнорируются возможности ТЭЦ в части регулирования генерации, а поскольку с переходом к парогазовой технологии их вклад в выработку электроэнергии возрастает в 3–4 раза при той же тепловой нагрузке, использование ТЭЦ для указанной цели безальтернативно.

В связи с изложенным, поставлена задача структурно-параметрической оптимизации тепловой схемы существующих ТЭЦ высоких начальных параметров пара при переходе на парогазовую технологию. Целевой функцией оптимизации является минимум потребления топлива при выполнении экономических ограничений, существующих в настоящее время. В том числе и за счет перехода к доминирующей роли в обеспечении неравномерности графика электрических нагрузок при одновременном снижении удельного расхода топлива на отпуск электроэнергии.

При модернизации ТЭЦ предложен системный подход, включающий комплекс мероприятий, обеспечивающих достижение поставленных целей:

1. Интеграция ГТУ в структуру ТЭЦ одновременно по утилизационной и по сбросной схемам [11], когда требуется обеспечение надежного пароснабжения потребителей. В этом случае создаются предпосылки для решения задач по

безусловному обеспечению технологических потребителей тепловой энергией и максимальному вытеснению паротурбинной технологии.

2. Применение парогазового оборудования, предполагающего использование параллельных связей ТЭЦ. Это, с одной стороны, позволяет максимально загружать газотурбинное оборудование на всевозможных режимах нагрузок. С другой стороны, обеспечивает сохранение температурного режима гидравлического тракта котла-утилизатора при вынужденной остановке ГТУ.

3. Применение ГТУ, обеспечивающих требуемый перегрев пара до 550 °С на всех режимах. Необходимо в случаях, когда по тем или иным причинам невозможно обеспечить перегрев пара до 500 °С, для минимизации пропуска пара в конденсатор, в связи с вынужденной избыточной генерацией в летний период, использование паровых котлов-утилизаторов с 2-х ступенчатым пароперегревателем, у которого высокотемпературная ступень обогревается в расщепленном потоке выхлопных газов, требуемая температура которого обеспечивается использованием меньшего количества природного газа прямого сжигания.

4. Стабилизация параметров воздуха перед компрессором ГТУ в межотопительный период за счет поддержания его температуры на уровне 15 °С при помощи абсорбционной холодильной машины. Это, с одной стороны, вытесняет конденсационную генерацию, с другой стороны, – увеличивает нагрузку отборов турбин [12].

5. Применение бромисто-литиевых тепловых насосов для исключения рассеивания тепловой энергии с циркуляционной водой [13].

6. Применение центральных тепловых аккумуляторов для обеспечения в отопительный период требуемой неравномерности генерации электроэнергии в соответствии с неравномерностью графика нагрузок при обеспечении потребителей тепловой энергии без вытеснения пиковыми котлами отборов турбин [14].

В результате такой модернизации ТЭЦ и ПГУ-ТЭЦ повышается эффективность использования природного газа, и ТЭЦ приобретают новые качества, позволяющие при сохранении отпуска тепловой энергии от источника регулировать график генерации электроэнергии без перерасхода топлива, что в условиях Беларуси актуально в настоящее время и чрезвычайно обостряется с пуском АЭС. Экономический эффект для Республики Беларусь определяется снижением годовой потребности импорта природного газа более чем на 1 млн т у. т.

#### Список литературы

1. Основные положения (Концепция) технической политики в электроэнергетике России на период до 2030 г. М. : РАО «ЕЭС России», 2008.
2. Бойс М. Турбомашиностроение в следующем тысячелетии // Газотурбинные технологии. 2000. № 5. С. 14–19.
3. Сигидов Я. Ю. Оптимизация структуры и параметров тепловых схем конденсационных парогазовых установок с котлами-утилизаторами трех давлений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : МЭИ, 2006.
4. Россиг-Круска Ф. Максимальная эксплуатационная гибкость электростанций // Газотурбинные технологии. 2008. № 2. С. 14–19.

5. Рукес Б., Тауд Р.. Современные технологии и перспективы выработки энергии на основе органических топлив // Газотурбинные технологии. 2003. № 5. С. 6–10.
6. Попырин Л. С., Дильман М. Д. Эффективность технического перевооружения ТЭЦ на базе парогазовых установок // Теплоэнергетика. 2006. № 2. С. 34–39.
7. Ольховский Г. Г. Масштабы и особенности применения газотурбинных и парогазовых установок за рубежом // Теплоэнергетика. 2002. № 9. С. 72–77.
8. Новикова Т. В., Ерохина И. В., Хорошев А. А. Масштабы внедрения ПГУ и ГТУ в среднесрочной перспективе // Газотурбинные технологии. 2005. № 9. С. 6–9.
9. Воронин В. П., Романов А. А., Земцов А. С. Пути технического перевооружения электроэнергетики // Теплоэнергетика. 2003. № 9. С. 2–6.
10. Молочко Ф. И., Молочко А. Ф. Способы регулирования нагрузки Белорусской энергосистемы после ввода АЭС // Энергетика и ТЭК. 2011. № 6. С. 18–26.
11. Романюк В. Н., Бобич А. А., Коломыцкая Н. А. Выбор схем парогазовых установок при модернизации паротурбинных ТЭЦ // Энергия и Менеджмент. 2013. № 3. С. 11–15.
12. Повышение эффективности ГТУ в летний период / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, Н. А. Коломыцкая [и др.] // Энергия и Менеджмент. 2011. № 1. С. 18–22.
13. Романюк В. Н., Бобич А. А., Мальков С. В. Абсорбционные или парокомпрессионные тепловые насосы в схемах ТЭЦ // Энергия и Менеджмент. 2013. № 4–5. С. 7–10.
14. Регулирование генерации электроэнергии при повышении эффективности использования ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, Н. А. Коломыцкая [и др.] // Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2012. № 2. С. 67–78.

УДК 621.313.333

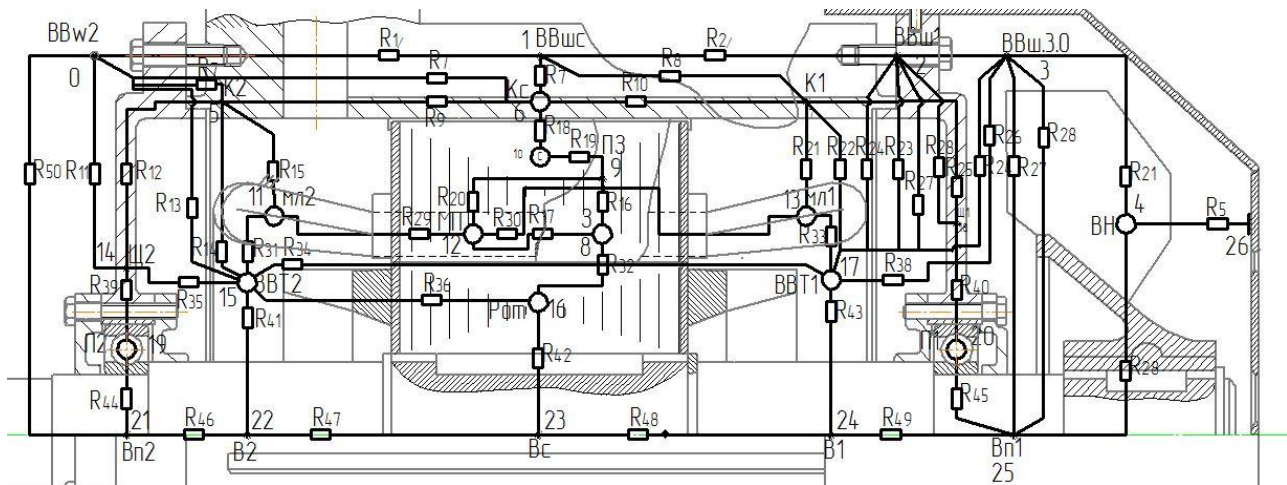
Боровских М. О., Нечаев А. В., Денисенко В. И.  
Уральский федеральный университет,  
kem\_em@urfu.ru

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЗАКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

Задачей данной исследовательской работы была разработка методики теплового расчета асинхронного двигателя с целью проверки выполнения требований по допустимому уровню нагрева активных частей машины, указанных в техническом задании на проектирование. Данная методика была разработана с привлечением специальной литературы, посвященной охлаждению асинхронных двигателей, аэродинамике и теплопередаче в электрических машинах. Все коэффициенты теплоотдачи поверхностей рассчитывались по эмпирическим критериальным формулам, полученным на основе многолетних исследований, проводимых на опытных образцах [1].

Для разработки методики теплового расчета использован метод эквивалентных тепловых схем. На первом этапе создания программы была составлена ЭТС двигателя (см. рисунок). При составлении эквивалентной тепловой схемы было выделено 12 тел, часть которых является источником тепла: бочка ротора,

вентилятор, пазовая и лобовая части обмотки статора, подшипниковые узлы, зубцы, ярмо статора и 50 тепловых сопротивлений, соответствующих направлению основных потоков тепла.



Эквивалентная тепловая схема асинхронного двигателя

Различное сопротивление сердечника собственным внешним тепловым потокам учтено соответствующим включением термических сопротивлений по методике, описанной в [1, п. 2.6].

Расчет выполнен с учетом подогрева воздуха во внешнем контуре вентиляции [2]. Узлы охлаждающего потока имеют особенности. Поток охлаждающей среды разбивается на 4 узла, граничащих с соответствующими элементами конструкции корпуса двигателя: со станиной, задним и передним подшипниковыми щитами, а также с вентилятором. Причем каждый узел охладителя связывается не только с омываемым элементом конструкции, но и с элементом, который омывается предшествующим элементом (узлом) охладителя. Особенностью узлов охлаждающего потока является отсутствие свойства взаимности: предыдущий узел влияет на последующий, но обратного влияния нет. Эта особенность учитывается с помощью проводимостей одностороннего действия.

Следующим этапом стал расчет тепловых сопротивлений и составление матрицы проводимостей. Заключительный этап расчета содержит в себе составление матрицы источников тепла (с учетом связей с окружающей средой) и расчет температуры узлов машины.

Расчет температур узлов выполнен на основе законов Ома и Кирхгофа для тепловой цепи. Предварительно определены термические сопротивления участков и мощности источников тепловыделения, на основе которых сформированы матрицы собственных и взаимных проводимостей узлов и вектор приведенных источников теплоты.

Метод эквивалентных тепловых схем реализован в среде MathCAD. Система уравнений тепловой схемы была решена в матричной форме [3]:

$$\Theta = -\lambda^{-1} \cdot P',$$



где  $\Theta$  – матрица-столбец (вектор) неизвестных температур размерности;  
 $\lambda^{-1}$  – обращенная матрица проводимостей;  
 $P'$  – вектор приведенных источников теплоты (потерь) размерности.

В качестве примера был проведен расчет асинхронного двигателя рДМ180М2 мощностью 22 кВт и величиной линейного напряжения 380 В.

Результаты расчета приведены в таблице.

Результаты расчета температурного режима асинхронного двигателя

№	Название узла	Абсолютная температура, °C
0	Температура внешнего воздуха со стороны выходного конца вала	48,840
1	Температура внешнего воздуха над электромагнитным ядром	47,882
2	Температура внешнего воздуха над подшипниковым щитом со стороны вентилятора	46,348
3	Температура внешнего воздуха между подшипниковым щитом и вентилятором	44,427
4	Температура вентилятора	42,269
5	Температура корпуса со стороны выходного конца вала	55,003
6	Температура корпуса над электромагнитным ядром	57,005
7	Температура корпуса со стороны вентилятора	48,612
8	Температура зубцовой части статора	74,828
9	Температура пазовой изоляции	74,819
10	Температура стали статора	63,867
11	Температура лобовой части обмотки статора со стороны выходного конца вала	104,568
12	Температура пазовой части обмотки статора	97,111
13	Температура лобовой части обмотки статора со стороны вентилятора	97,527
14	Температура подшипникового щита со стороны выходного конца вала	55,001
15	Температура внутреннего воздуха со стороны выходного конца вала	90,476
16	Температура активной части ротора	83,835
17	Температура внутреннего воздуха со стороны вентилятора	49,285
18	Температура подшипникового щита со стороны вентилятора	48,579
19	Температура активной части подшипника со стороны выходного конца вала	86,387
20	Температура активной части подшипника со стороны вентилятора	64,365
21	Температура выходного конца вала в месте посадки подшипника	73,283
22	Температура средней части вала между подшипниковым щитом и местом посадки бочки ротора со стороны выходного конца вала	85,652
23	Температура вала в месте посадки бочки ротора	83,830
24	Температура средней части вала между подшипниковым щитом и местом посадки бочки ротора со стороны вентилятора	69,491
25	Температура вала в месте посадки подшипника со стороны вентилятора	54,495

На основе ЭТС и данной методики были получены абсолютные температуры основных узлов двигателя, значения которых находятся в допустимых пределах. Полученные результаты показывают, что конструкция двигателя и применяемая система охлаждения спроектированы правильно.

Разработанную программу целесообразно использовать для уточненной оценки теплового состояния асинхронных двигателей и эффективности системы охлаждения.

#### Список литературы

1. Борисенко А. И., Костиков О. Н., Яковлев А. И. Охлаждение промышленных электрических машин. М. : Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
2. Денисенко В. И., Клейменов Е. А. К оценке мощных трансформаторов с принудительным масляно-воздушным охлаждением // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых. Екатеринбург. 11–14 ноября 2008 г. УГТУ-УПИ, 2008. С. 67–70.
3. Сипайлов Г. А., Санников Д. И., Жадан В. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. М. : Высшая школа, 1989. 240 с.

УДК 662.99

Бортников М. А., Шемпелев А. Г.  
Вятский государственный университет, г. Киров  
maksimb10@mail.ru

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАТНОЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ НА ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЭЦ**

Известно, что снижение температуры холодного источника является одним из наиболее эффективных способов повышения коэффициента полезного действия прямого термодинамического цикла. В циклах теплофикационных паротурбинных установок к холодным источникам можно отнести воду, охлаждающую конденсатор и сетевую воду, нагреваемую в сетевых подогревателях. Температура охлаждающей воды в основном зависит от температуры окружающей среды, а температура сетевой воды определяется температурным графиком, который также отражает изменение температуры наружного воздуха.

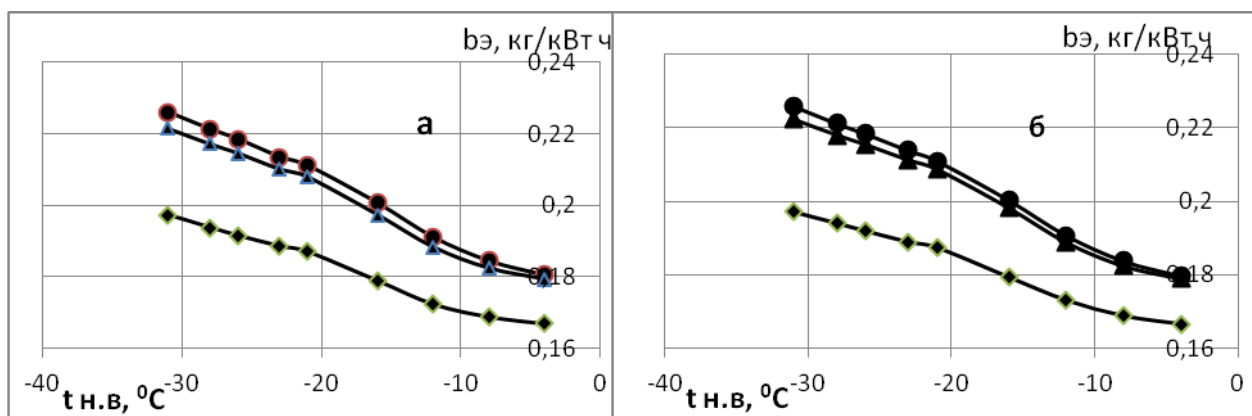
Кроме того, известно, что одним из основных направлений повышения эффективности работы теплофикационных турбин является снижение потерь теплоты в конденсаторах и увеличение доли электроэнергии, вырабатываемой на тепловом потреблении. Указанная цель принципиально может быть достигнута по двум направлениям: за счет полезного использования теплоты отработавшего пара (например, для подогрева технологической и сетевой воды) или за счет уменьшения до предельно допустимого значения расхода пара в части низкого давления (ЧНД) и конденсаторе, охлаждаемого циркуляционной водой.

Одним из способов реализации первого направления является перевод одной из нескольких турбоустановок в отопительный период работы ТЭЦ на теплофикационный режим работы, с охлаждением конденсатора обратной сетевой водой и с последующей ее подачей в сетевые подогреватели. В этом случае вся теплота, поступающая в конденсатор, полезно используется. Однако такой способ имеет ряд недостатков, обусловленных повышенной температурой обратной сетевой воды. Основными из них являются: ухудшенный вакуум, необходимость снятия турбинных ступеней ЧНД или замена ротора низкого давления на промежуточный вал (что приводит к необходимости обратной замены при переходе на летний режим), ухудшенное термомеханическое состояние турбины, сложности с регулированием температуры воды на выходе из конденсатора и ряд других. Представляется, что указанных недостатков можно избежать, если существенно снизить температуру обратной сетевой воды.

В последнее время рассматриваются возможности подключения к трубопроводам обратной сетевой воды низкопотенциальных систем отопления (например, с использованием теплых полов), тепловых насосов, снегоплавильных установок, обогревателей ступеней лестниц, пандусов, открытых площадок и т. п. Использование указанных устройств в широких масштабах, по нашим оценкам, позволит существенно понизить ее температуру.

Целью настоящей работы является выявление преимуществ использования на ТЭЦ обратной сетевой воды с пониженной относительно температурного графика температурой.

Для достижения этой цели проведены расчётные исследования двух турбоустановок Т-50-130 Кировской ТЭЦ-4, имеющих связи между гидравлической системой конденсатора первой установки и трубопроводом воды на входе в нижний сетевой подогреватель второй установки. Расчеты производились с помощью компьютерной программы полного теплового расчета турбоустановки Т-50-130, разработанной на кафедре «Теплотехника и гидравлика» ВятГУ. Рассчитывалось два варианта: первый – при постоянной температуре обратной сетевой воды, равной  $40^{\circ}\text{C}$ , второй – при изменении температуры обратной воды в зоне качественного регулирования от  $40$  до  $50^{\circ}\text{C}$ . В качестве базового был принят режим, соответствующий температурному графику 150/70. В ходе расчетов рассматривались режимы с двухступенчатым и трехступенчатым подогревом сетевой воды при постоянном отпуске теплоты в каждом режиме, соответствующем выбранной точке температурного графика. При трёхступенчатом подогреве половина сетевой воды, прошедшей через конденсатор первой турбины, направлялась в нижний сетевой подогреватель второй турбоустановки. Расход охлаждающей конденсатор воды при двухступенчатом подогреве был принят равным  $7000 \text{ т/ч}$ , при трехступенчатом подогреве расход сетевой воды через конденсатор составлял от  $2200$  до  $3000 \text{ т/ч}$ . Зависимость расхода удельного топлива от температуры наружного воздуха приведено на следующем графике:



Зависимость удельных расходов условного топлива от температуры наружного воздуха:  
**а** – температура обратной сетевой воды 40 °С; **б** – температура обратной сетевой воды 40–50 °С; ● – базовый режим; ▲ – режим с двухступенчатым подогревом; ◆ – режим с трехступенчатым подогревом.

Проведенные предварительные расчеты позволили выявить следующие преимущества использования на ТЭЦ сетевой воды с пониженной температурой:

- сохраняется маневренность турбоустановки, поскольку для подогрева сетевой воды может быть использован только один из основных трубных пучков, а в другой трубный пучок и во встроенный в любой момент может быть подана охлаждающая вода;
- при сохранении отпуска теплоты реализация способа требует значительно меньших расходов сетевой воды, что позволит существенно снизить расходы электроэнергии на привод сетевых насосов;
- давление в конденсаторе на всех рассмотренных режимах не превышает 17 кПа, что позволяет эксплуатировать турбоустановку без удаления турбинных ступеней части низкого давления;
- могут быть существенно улучшены условия эксплуатации теплосети;
- переход на сетевую воду с пониженной температурой позволяет существенно повысить экономичность турбоустановки.

УДК 536.22

Валиюллина А. А., Евграфов В. А.  
Тюменский государственный архитектурно-строительный университет  
valiyullinaa@yandex.ru

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

В условиях снижения затрат тепла в соответствии с законом энергетической эффективности возникает необходимость определения коэффициента

теплоотдачи в процессах кипения, которые осуществляются, в частности, в парогенераторах ТЭЦ. К настоящему времени выполнено значительное количество работ, посвященных процессам кипения жидкостей и переносу теплоты в кипящих жидкостях. Но проблема определения численных значений коэффициента теплоотдачи при кипении однофазных жидкостей до сих пор остается актуальной, так как точность определения коэффициента теплоотдачи влияет на точность расчета тепловых потоков.

При пузырьковом кипении жидкости основной поток тепла от нагреваемой поверхности передается жидкой фазе в связи с тем, что она имеет значительно большую теплопроводность, чем паровая фаза (при давлении  $p = 1$  бар для воды коэффициент теплопроводности составляет  $0,68 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , а для водяного пара –  $0,02 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ). Таким образом, как в случае конвекции однофазной жидкости, при кипении основным является тепловое сопротивление пограничного слоя жидкости. Результаты экспериментов показывают, что процесс теплоотдачи между перегретой жидкостью и поверхностью пузырька отличается высокой интенсивностью. При этом коэффициенты теплоотдачи от воды к пару достигают величин порядка  $200\,000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Только за счет такого интенсивного значения коэффициента теплоотдачи пузырек при всплывании жидкости значительно увеличивается в размерах [1].

При изучении процессов теплообмена использовалась экспериментальная установка. Целью эксперимента являлось определение погрешности коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости между полученными опытными данными (таблица) и приведенными в литературе.

Площадь боковой поверхности цилиндра определяется из соотношения

$$F = \pi \cdot D \cdot L = 3,14 \cdot 29 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 6,374 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (1)$$

Образцовое сопротивление  $R_0 = 0,1 \text{ Ом}$ .

Тепловой поток определяется по мощности, потребляемой нагреваемым цилиндром:

$$Q = U_H \cdot \frac{U_0}{R_0}, \quad (2)$$

где  $U_H$  – напряжение на нагревателе цилиндра, В;  $U_0$  – падение напряжения на образцовом сопротивлении, В.

Данные, полученные в ходе эксперимента

№ п/п	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$U_H, \text{В}$	$U_0, \text{В}$	$Q, ^\circ\text{C}$
1	102,1	99,1	99,0	194,3	3,182	6183
2	103,2	98,6	99,3	194,3	3,255	6324
3	106,9	98,6	99,4	195,2	3,395	6627
4	108,1	104,7	107,5	196,3	3,675	7214
5	114,2	105,9	108,5	197,2	3,866	7624
	$\bar{t}_1, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_2, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_3, ^\circ\text{C}$	$\bar{U}_H, \text{В}$	$\bar{U}_0, \text{В}$	$\bar{Q}, \text{Вт}$
	106,9	101,4	103,7	195,5	3,475	6794
$t_c = \frac{\bar{t}_1 + \bar{t}_3}{2} = \frac{106,9 + 103,7}{2} = 105,3$						

По данным таблицы, определим экспериментальный средний коэффициент теплоотдачи между поверхностью обогреваемого цилиндра и кипящей воды по соотношению

$$\alpha_{\text{экспер}} = \frac{Q}{F \cdot (t_c - t_n)} = \frac{6794}{6,374 \cdot 10^{-3} \cdot 5,3} = 201122 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}, \quad (3)$$

где  $Q$  – тепловой поток, передаваемый от поверхности цилиндра к воде, Вт;  $F$  – площадь поверхности цилиндра,  $\text{м}^2$ ;  $t_c$  – средняя температура этой поверхности,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_n$  – температура насыщения при атмосферном давлении,  $^{\circ}\text{C}$ .

Температуру насыщения при атмосферном давлении определяем по теплофизическому справочнику:  $t_n = 100^{\circ}\text{C}$ .

При пузырьковом кипении воды в атмосферных условиях различают две области кипения. В первой области при малых температурных напорах ( $\Delta t \leq 5^{\circ}\text{C}$ ) значения коэффициента теплоотдачи невелики и определяются условиями свободной конвекции однофазной жидкости. Во второй области при повышенных температурных напорах ( $5^{\circ}\text{C} \leq \Delta t \leq 25^{\circ}\text{C}$ ) коэффициент теплоотдачи значительно возрастает. Это связано с интенсивной конвекцией жидкости вследствие роста и движения паровых пузырей. В условиях эксперимента установлено, что температурный напор составляет  $\Delta t = 5,3^{\circ}\text{C}$ . Для воды применяют зависимости, полученные из опытных данных:

$$\alpha = 38,7 \cdot \Delta t^{2,33} p^{0,5}, \quad (4)$$

где  $p$  – атмосферное давление, бар.

Так как опыт проводится при атмосферном давлении, принимаем  $p = 1$  бар.

Тогда

$$\alpha_{\text{теор}} = 38,7 \cdot 5,3^{2,33} \cdot 1^{0,5} = 1885 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}.$$

Имеется значительное несоответствие между опытными данными и теоретическими значениями. Чтобы установить истину, обратились к научной литературе.

При изучении литературы было установлено, что теплоотдача между перегретой жидкостью и поверхностью пузырька отличается большой интенсивностью. Именно за счет этого пузырек при всплывании в жидкости значительно увеличивается в размерах.

Таким образом, значение коэффициента теплоотдачи соответствует литературным данным [2].

$$\alpha_{\text{экспер}} = \frac{q}{(t_c - t_n)}, \quad (5)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, равная отношению количества теплоты к площади боковой поверхности медного цилиндра, помещенного в жидкость. Приведенное уравнение (5) совпадает с расчетным уравнением (3), согласно которому был рассчитан коэффициент теплоотдачи.

Таким образом, приведенная в методических указаниях расчетная формула (4) не может быть применена для данного опыта. Первоначально поставленная цель работы не выполнена. Это связано с неточностью приведенного в паспорте уравнения. Но полученные экспериментально величины коэффициента

теплоотдачи являются достоверными и соответствуют приведенным данным в литературе.

Проведем оценку погрешности определения коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении, полученного экспериментальным путем (3).

В связи с тем, что все измеряемые параметры определяются с допускаемыми отклонениями, которые можно считать предельными значениями погрешности, то и сам коэффициент теплоотдачи может быть оценен с каким-то пределом допускаемой погрешности. Коэффициент теплоотдачи определяется как результат косвенных измерений параметров  $Q$ ,  $F$ ,  $t_c$ ,  $t_n$ , поэтому предел допускаемой абсолютной погрешности определения коэффициента теплоотдачи может быть подсчитан по формуле (6):

$$\Delta\alpha = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial\alpha}{\partial Q}\right) \cdot \Delta Q\right)^2 + \left(\left(\frac{\partial\alpha}{\partial t_c}\right) \cdot \Delta t_c\right)^2}. \quad (6)$$

Расчетный коэффициент теплоотдачи равен:

$$\alpha_{\text{экспер}} = \frac{Q}{F \cdot (t_c - t_n)} = \frac{6794}{6,374 \cdot 10^{-3} \cdot 5,3} = 201122 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}.$$

Предел допускаемой относительной погрешности:

$$\delta_{\alpha} = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_{\text{экспер}}} \cdot 100 = \pm \frac{1909}{201122} \cdot 100 = \pm 1 \, \%.$$

Из результатов расчета абсолютной погрешности измерения коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении следует, что наибольшая составляющая величины погрешности связана с погрешностью измерения напряжения. При детальном изучении погрешности измерения напряжения было установлено, что наибольшая величина случайной погрешности связана с измерением падения напряжения на образцовом сопротивлении.

#### Список литературы

1. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен : учебник для вузов. М. : Издательский дом МЭИ, 2011. 562 с., ил.
2. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: учебник для вузов. М.–Л. : Энергия, 1982. 422 с., ил.
3. Исследование теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости: паспорт лабораторного комплекса. 4 с.

УДК 697.34

Ветлов Е. С.  
Уральский федеральный университет,  
Vetlov66@rambler.ru

## **ОЦЕНКА МАСШТАБОВ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ НА ОБОГРЕВ СПУТНИКОВ ХВС**

Передача тепла в системах централизованного теплоснабжения всегда сопровождается потерями энергии в окружающую среду. Определение величины



тепловых потерь при тарифообразовании регламентируется [1], но на практике нормативные тепловые потери зачастую существенно ниже фактических.

Наиболее точные результаты при оценке фактических тепловых потерь позволяет получить методика [2]. Состоятельность данного метода подтверждается опытными результатами, полученными в работе Г. Ш. Димидова [3].

Основной тип прокладки рассматриваемых сетей надземный, при этом почти во всех населенных пунктах с надземной прокладкой совместно с трубопроводами ГВС в одном пучке уложены трубы холодного водоснабжения.

Такая совместная укладка трубопроводов обусловлена защитой водовода от перемерзания в зимний период. Теплоизоляция такого пучка трубопроводов выполнена единой оплеткой, что естественно приводит к потерям тепловой энергии в водовод. Оптимальным решением данной проблемы может стать укладка водовода в общем пучке с устройством для него дополнительной отдельной изоляции.

В настоящей статье предложена упрощенная методика качественной оценки тепловых потерь на обогрев спутника ХВС.

На рис. 1 показана наиболее характерная для обследованных населенных пунктов Свердловской области конструкция совместной прокладки трубопроводов горячего и холодного водоснабжения. В качестве расчетной модели вычислений используется схема, применяемая при расчетах теплообмена в теплоизоляционных конструкциях обогреваемых продуктопроводов [4].

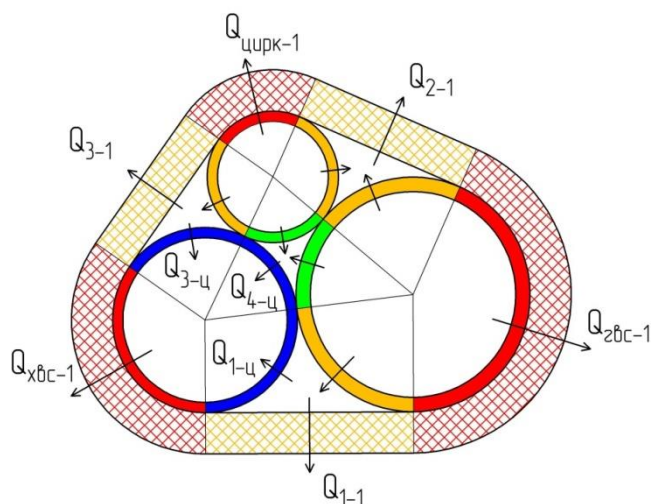


Рис. 1. Расчетная схема пучка трубопроводов; трубопроводы:

ГВС – горячее водоснабжение;  
цирк – циркуляция горячей воды;  
ХВС – холодное водоснабжение

Для вычисления тепловых потоков использовалось уравнение теплопередачи [5]:

$$Q = k (t_1 - t_2) F, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площадь поверхности теплообмена;  $(t_1 - t_2)$  – разность температур, °С.

Значения температур воздуха в полостях, образованных теплоизоляционным кожухом и трубами, определялись из балансовых уравнений (2) и (3):

$$Q_{\text{пол-н.в.}} + Q_{\text{тр-пол}}^{i1} + Q_{\text{тр-пол}}^{i2} = 0, \quad (2)$$

$$Q_{\text{тр-пол}}^{\text{ХВС}} + Q_{\text{тр-пол}}^{\text{ГВС}} + Q_{\text{тр-пол}}^{\text{цирк}} = 0, \quad (3)$$

где  $Q$  – тепловые потоки через поверхности, образующие полость, Вт/м<sup>2</sup>;  $Q_{\text{пол-н.в.}}$  – теплоизоляционный слой;  $Q_{\text{тр-пол}}^{il}$  – сектора трубопроводов.

Основываясь на данной методике, были получены результаты и зависимости, характеризующие процесс переноса тепла в пучке трубопроводов. На рис. 2 представлены значения потерь энергии от температуры наружного воздуха в теплопроводе с теплоизоляционной оплеткой толщиной  $\delta_{\text{изол}} = 30$  мм. На рис. 3 показано влияние толщины общей теплоизоляционной оплетки на характер распределения тепловых потерь. Так для среднегодовых условий работы системы теплоснабжения 0,6 °С и толщине изоляции 30 мм полные линейные тепловые потери составляют 25 Вт/м, а доля потерь в спутник ХВС составляет 61 % (15 Вт/м).

Укладка трубопровода ХВС в отдельной теплоизоляции позволяет значительно снизить тепловые потери (рис. 4), так для тех же условий ( $t_{\text{н.в.}} = 0,6$  °С,  $\delta_{\text{изол}} = 30$  мм) и толщине изоляции ХВС 20 мм полные линейные тепловые потери составляют 19 Вт/м, а доля потерь в спутник ХВС составляет 35 % (6 Вт/м), т. е. за счет изоляции водовода холодного водоснабжения потери снизятся на 24 %.

На рис. 5 представлены результаты расчетов для наиболее распространенных сочетаний диаметров трубопроводов. Из рис. 5 видно, что вклад потерь водовода в общем балансе тепловых потерь с уменьшением диаметров трубопроводов в пучке увеличивается.

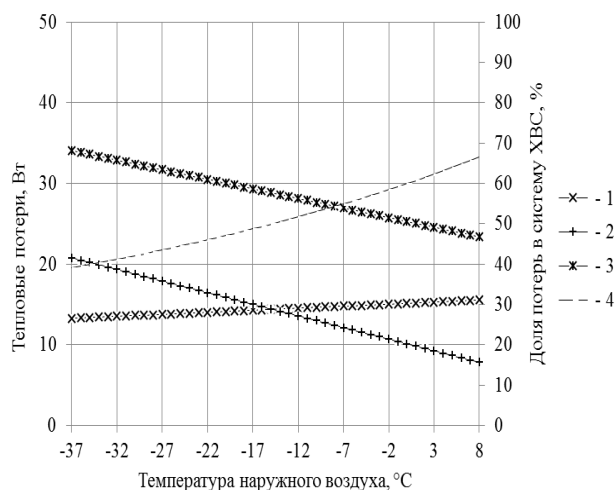


Рис. 2. Зависимость тепловых потерь в пучке трубопроводов со спутником ХВС от температуры наружного воздуха:  
1 – потери в спутник ХВС;  
2 – потери в окружающую среду;  
3 – суммарные потери;  
4 – доля потерь в спутник ХВС

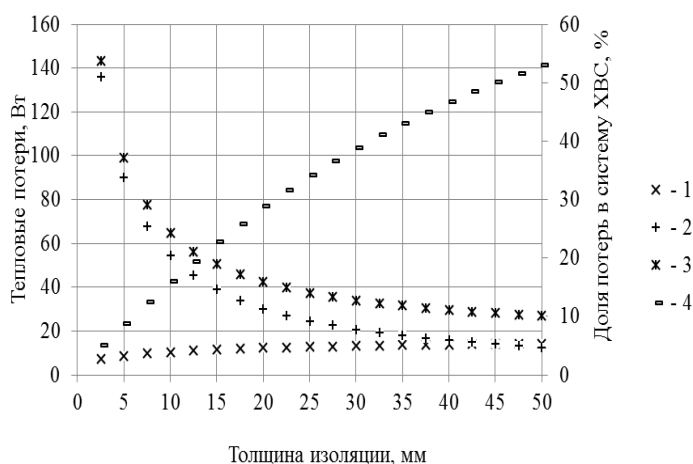


Рис. 3. Зависимость тепловых потерь в окружающую среду и в спутник ХВС от толщины изоляции:  
1 – потери в спутник ХВС;  
2 – потери в окружающую среду;  
3 – суммарные потери;  
4 – доля потерь в спутник ХВС

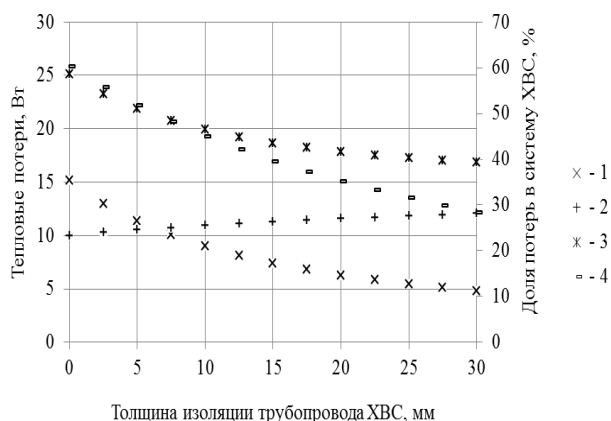


Рис. 4. Зависимость тепловых потерь в окружающую среду и в спутник ХВС от толщины теплоизоляции, покрывающей трубопровод ХВС:  
1 – потери в спутник ХВС;  
2 – потери в окружающую среду;  
3 – суммарные потери;  
4 – доля потерь в спутник ХВС

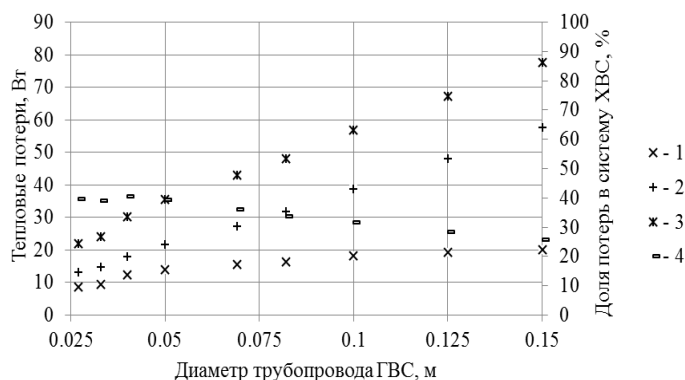


Рис. 5. Зависимость тепловых потерь в окружающую среду и в спутник ХВС для пучков трубопроводов различного диаметра:  
1 – потери в спутник ХВС;  
2 – потери в окружающую среду;  
3 – суммарные потери;  
4 – доля потерь в спутник ХВС

#### Список литературы

1. Инструкция по организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, утв. приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 30 декабря 2008 г. № 325.
2. РД 34.09.255-97. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях. М., 1998.
3. Димидов Г. Ш. Об испытаниях теплопроводов в ППМ-изоляции // Новости теплоснабжения. 2006. № 4. С. 37–40.
4. Хижняков С. В. Практические расчеты тепловой изоляции (для промышленного оборудования и трубопроводов). Изд. 3-е, перераб. М. : Энергия, 1976.
5. Королев В. Н. Тепломассообмен : учеб. пособие. Екатеринбург : УПИ, 2006.

УДК 62-685

Гимадиева Г. А., Зиганшин А. М.  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
amziganshin@kgasu.ru

## ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ В ПЛОСКОМ ВЫТЯЖНОМ ТРОЙНИКЕ

Основное количество энергии, затрачиваемое в системах вентиляции, расходуется на преодоление сил трения, а также потерь давления в местных сопротивлениях. Последняя составляющая потерь происходит из-за изменения структуры течения в возмущающих элементах (ВЭ). Исследование течения в возмущающих элементах позволяет более подробно изучить его характеристики и возможные пути снижения местных потерь. В работе численно исследуется течение в вытяжном равнобедренном (ширина канала  $b = 0,1$  м) тройнике на

слияние. Задача решается в двухмерной турбулентной постановке, при этом используется универсальная  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, в сочетании со стандартными пристеночными функциями. На рис. 1 приведена геометрия расчетной области, а также характерные линии тока. Здесь  $CD$  – граница, через которую воздух вытягивается через тройник,  $AB$  и  $EF$  – проницаемые границы (задается избыточное давление), остальные границы – непроницаемые стенки тройника – внешние границы расчетной области.

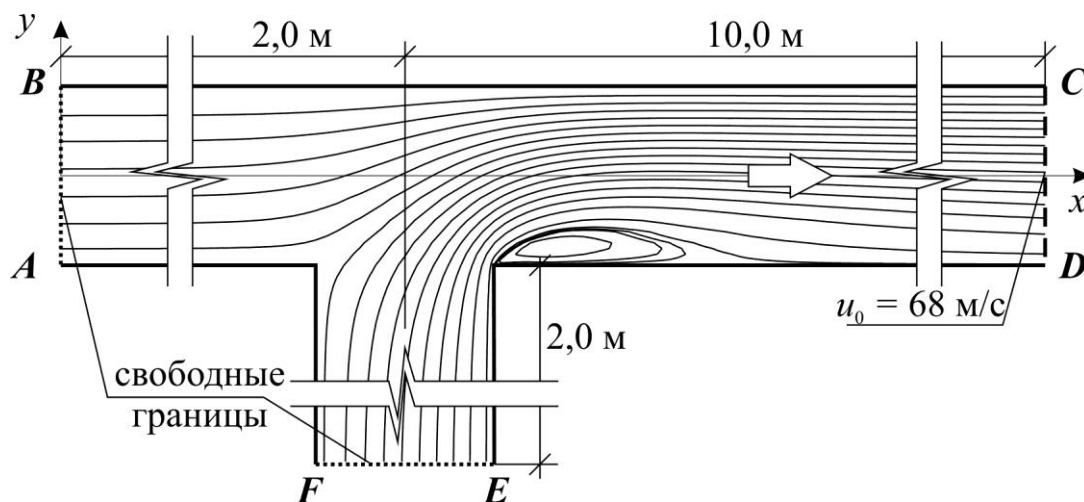


Рис. 1. Геометрия расчетной области и линии тока течения

На рис. 1 видна отрывная зона, образующаяся у острой кромки тройника. Длины каналов вверх по течению (ответвления прямое и боковое, согласно терминологии [1]) взяты равными  $20b$ , а вниз по течению (слияние) –  $100b$ .

Рассчитывался ряд задач с разным соотношением расходов  $G_B/G_C$ , для чего на границах  $AB$  и  $EF$  изменялось избыточное давление, его значения, а также получающееся при этом отношение  $G_B/G_C$  представлены в таблице:

Значения избыточных давлений на границах  $AB$  и  $EF$  и величина  $G_B/G_C$

$P_n^{AB}$ , Па	$P_n^{EF}$ , Па	$G_{AB}$ , кг/с	$G_{EF}$ , кг/с	$G_{CD}$ , кг/с	$G_B/G_C$
-10000	0	-2,630	10,962	8,333	1,316
-2000	0	1,168	7,161	8,330	0,860
-1500	0	2,410	5,920	8,330	0,711
-1000	0	2,896	5,434	8,330	0,652
-500	0	2,582	5,748	8,329	0,690
0	0	3,428	4,902	8,330	0,588
0	-500	3,778	4,552	8,330	0,546
0	-700	4,075	4,255	8,330	0,511
0	-1000	5,056	3,273	8,329	0,393
0	-1500	5,044	3,286	8,330	0,394
0	-2000	5,128	3,201	8,330	0,384
0	-3000	6,365	1,965	8,330	0,236
0	-4000	7,304	1,026	8,329	0,123
0	-5000	8,855	-0,526	8,329	-0,063

Характерные линии тока, представленные на рис. 1, взяты из задачи с избыточными давлениями на ответвлениях, равными нулю. Из этой же задачи далее на рис. 2 представлены графики изменения давлений – полного  $P_{\Pi}$ , статического  $P_{\text{СТ}}$  и динамического –  $P_{\text{ДИН}}$  по длине канала с тройником.

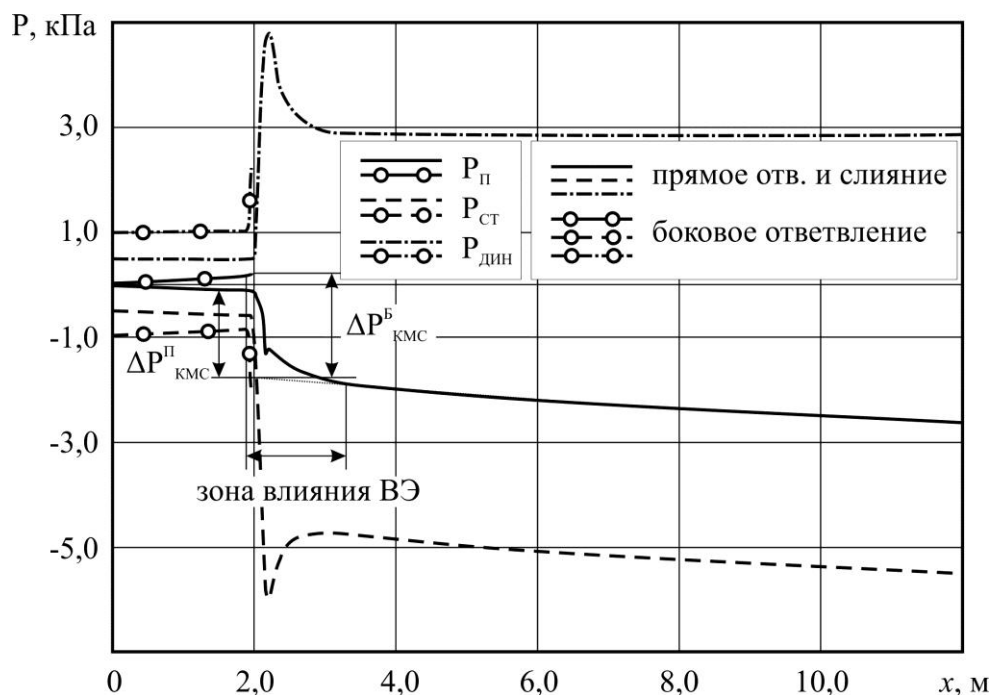


Рис. 2. Изменение давлений по длине канала с тройником

На графике (рис. 2) видны зоны линейного изменения полного давления – изменение давления происходит только за счет трения. Зона резкого падения полного давления – зона влияния тройника, а также показаны величины изменения давления за счет местного сопротивления по боковому  $\Delta P^{\text{Б}}_{\text{КМС}}$  и прямому  $\Delta P^{\Pi}_{\text{КМС}}$  ответвлению. Здесь также нужно отметить увеличение полного давления в боковом ответвлении, такое явление связано с эжекцией из бокового ответвления потоком, проходящим с прямого.

Используя результаты численного расчета, можно определить коэффициент местного сопротивления для прямого ответвления:

$$\zeta^{\Pi} = \frac{P_{\Pi}^{\text{AB}} - P_{\Pi}^{\text{CD}} - \Delta P^{\Pi-\text{C}}_{\text{тр}}}{P_{\text{ДИН}}}.$$

И для бокового ответвления:

$$\zeta^{\text{Б}} = \frac{P_{\Pi}^{\text{FE}} - P_{\Pi}^{\text{CD}} - \Delta P^{\text{Б}-\text{C}}_{\text{тр}}}{P_{\text{ДИН}}}.$$

Здесь  $P_{\Pi}^{\text{AB}}$ ,  $P_{\Pi}^{\text{FE}}$ ,  $P_{\Pi}^{\text{CD}}$  – значения полного давления на соответствующей границе,  $\Delta P^{\Pi-\text{C}}_{\text{тр}} = R_{\Pi} \cdot l_{\Pi} + R_{\text{C}} \cdot l_{\text{C}}$  – суммарные потери давления на трение в прямом ответвлении и в канале после тройника (на слиянии);  $\Delta P^{\text{Б}-\text{C}}_{\text{тр}} = R_{\text{Б}} \cdot l_{\text{Б}} + R_{\text{C}} \cdot l_{\text{C}}$  – суммарные потери давления на трение в боковом ответвлении и в канале после тройника (на слиянии);  $P_{\text{ДИН}}$  – динамическое давление в канале по среднерасходной скорости в канале после тройника. Значения удельного падения давле-

ния в ответвлениях ( $R_B$ ,  $R_{II}$ ) и в канале после тройника на слиянии ( $R_C$ ) определены по данным численного расчета. На рис. 3 показаны линии изменения значений КМС  $\zeta^{\Pi}$  и  $\zeta^B$  в зависимости от соотношения расходов  $G_B/G_C$ .

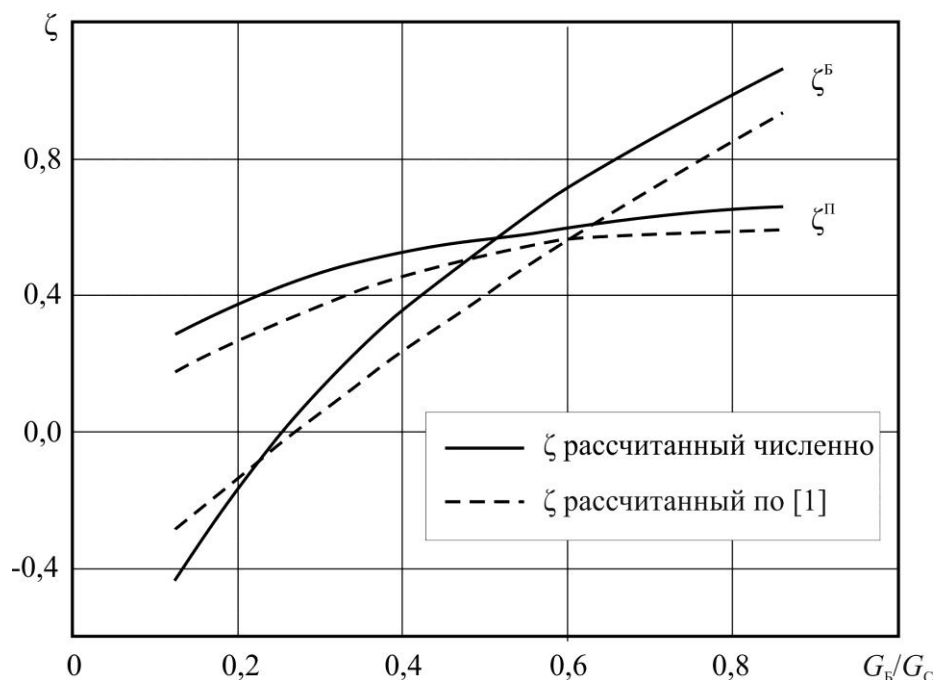


Рис. 3. Зависимость  $\zeta$  от  $G_B/G_C$

Здесь же нанесены линии, построенные по данным [1]. Видно некоторое отличие в большую сторону, но как количественно, так и качественно хорошее соглашение численных и экспериментальных результатов.

#### Список литературы

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.

УДК 504.064.4

Головин А. А., Куликова Е. А.  
Уральский государственный университет путей сообщения,  
AlGolovin1993@mail.ru, kulikova.elena@mail.ru

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ САПР

Состояние электрических сетей – один из важнейших показателей уровня развития электроэнергетики страны. На сегодняшний день в России более 50 % оборудования электрических сетей выработало расчетный ресурс, хотя еще сохраняет достаточную работоспособность. Ухудшение технического состояния

электрических сетей – одна из основных причин роста повреждений воздушных линий электропередачи (ЛЭП) и силового оборудования подстанций. Реконструкция и модернизация электрических сетей требует огромных затрат различных видов ресурсов, поэтому актуальной остается задача выбора оптимального варианта проектирования линии с заданной степенью надежности.

Надежность работы ЛЭП зависит от качества процессов проектирования, выполнения строительно-монтажных работ, ввода в действие, эксплуатации в различных режимах и атмосферно-климатических условиях [1].

Метеорологические факторы (гололедообразование, ветер и температура воздуха) влияют на безаварийность работы ЛЭП. Гололедно-ветровые аварии сопровождаются многочисленными обрывами проводов и тросов, поломкой опор, массовыми отключениями воздушных линий всех классов напряжения и нарушением электроснабжения потребителей с соответствующим ущербом.

Основными повреждениями металлических опор, наиболее широко применяемых для ЛЭП, являются разрывы из-за механических перегрузок, вызванных ошибками проектирования и монтажа; деформации от наездов, ударов посторонними предметами; хрупкие разрушения при низких температурах, коробление и потеря несущей способности при повышенной температуре; разрушения из-за коррозии.

При эксплуатации опор высоковольтных ЛЭП отказы возникают при хрупком разрушении, когда нагрузка точек подвеса превышает прочность; усталостном разрушении, когда циклическая нагрузка не превышает прочность. Причем, во втором случае нагрузка может быть меньше предела упругости.

Использование моделирования на этапе проектирования позволяет прогнозировать большинство этапов жизненного цикла технического объекта, а также существенно минимизировать ресурсозатраты проектировщика.

Основные достоинства САПР – быстрое выполнение поставленной задачи, повышение точности и качества проекта, ускорение расчетов и процедуры анализа при проектировании, сокращение затрат на усовершенствование.

Программное обеспечение для моделирования систематически совершенствуется с целью улучшения характеристик объекта исследования на раннем этапе разработки.

Компьютерное моделирование помогает проектировщикам понять, какие решения возможны для оптимизации проекта, сокращает и заменяет дорогостоящий длительный процесс создания физических моделей и их тестирования, значительно снижает затраты на разработку продукта.

Этап конструирования предполагает объемное и плоское геометрическое моделирование, инженерный анализ на расчетных моделях высокого уровня, оценку проектных решений, выполнение чертежей.

В зависимости от функциональных возможностей, набора модулей и структурной организации, системы проектирования условно разделяют на три группы: легкие, средние и тяжелые системы.



Рассмотрим расчет работы промежуточной опоры ЛЭП 500 кВ типа Р1 (рис. 1) с помощью CAD системы среднего класса – программного продукта *Solid Works 2013 Premium* [2].

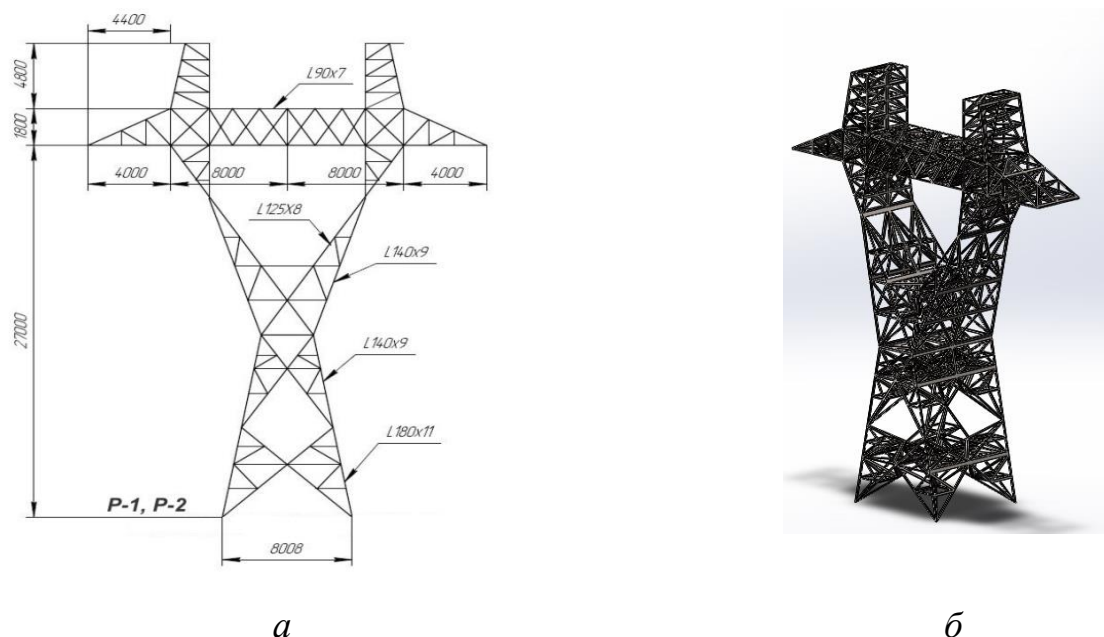


Рис. 1. Опора ЛЭП 500 кВ типа Р1: а – типовые размеры; б – модель в *Solid Works*

Для создания модели выполняется эскиз детали на плоскости, которой далее придается объем. Аналогично создаются металлические распорки.

После создания опоры Р1 можно переходить непосредственно к механическим испытаниям. Для этого в дополнительном модуле инженерного анализа *Simulation* нагружаем опору в точках крепления подвесных изоляторов силами, равными по значению весу проводов расщепленной фазы. По итогам испытаний получаем эпюру напряжений со шкалой распределения нагрузок (рис. 2).

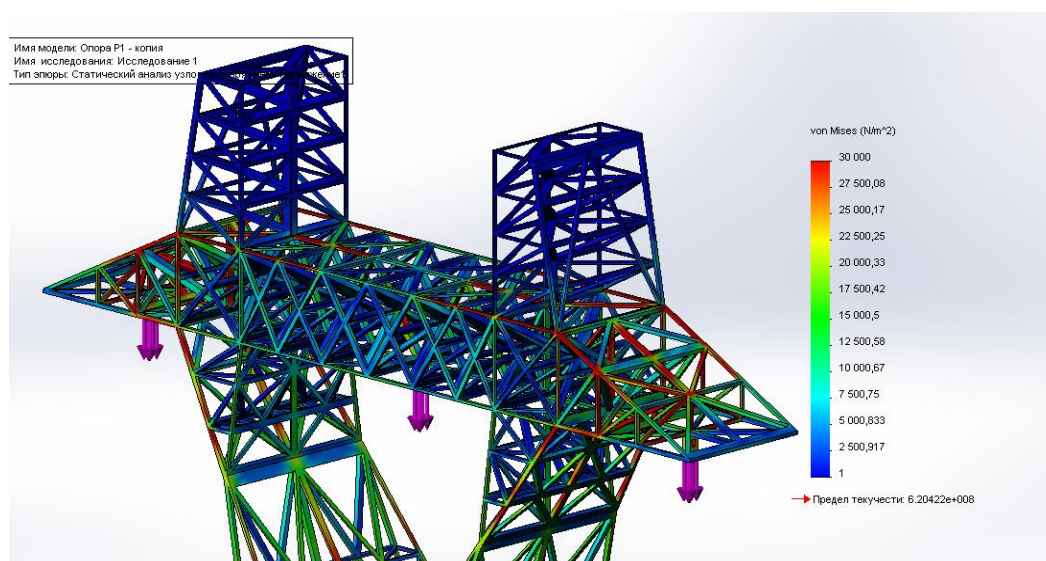


Рис. 2. Результаты механических нагрузок и шкала распределения нагрузок

По итогам испытаний, проводимых в научно-исследовательской лаборатории «Системы автоматизированного проектирования контактной сети» Уральского государственного университета путей сообщения (НИЛ САПР КС) [3], сделан вывод о том, что нагрузки не превышают предел текучести материала. Следовательно, промежуточные свободностоящие опоры Р1 вполне справляются со своими функциями поддерживающей конструкции. Это пример выбора оптимального варианта линии с заданной степенью надежности на ранних этапах проектирования.

Программный продукт *Solid Works* содержит все необходимые инструменты для моделирования и проведения термических и механических испытаний элементов ЛЭП; анализа различных материалов и прогнозирования их поведения под теми или иными нагрузками при воздействии внешних факторов; отработки новых конструктивных решений; проведения простейших испытаний без создания опытного образца и использования дорогостоящих испытательных лабораторий.

При проектировании любого устройства электроэнергетики необходимо создать объект с наибольшим временем наработки до отказа. Чем надежнее система, тем меньше вероятность отказа, как отдельного ее элемента, так и всей системы. Уменьшение риска отказа приводит к уменьшению вложений финансовых ресурсов в реконструкцию данного объекта и, как следствие, объект за весь срок службы приносит больший экономический эффект.

Таким образом, применение САПР *Solid Works* при проектировании различных объектов электроэнергетики позволяет существенно сократить время разработки элемента, а также обойтись без создания для испытаний дорогостоящей физической модели объекта, т. е. решает задачу ресурсосбережения на этапе проектирования.

#### Список литературы

1. Высшая математика, физика, теория электрических цепей, механизмов и машин [Электронный ресурс]. URL: <http://fizses.ru> (дата обращения: 11.10.2014).
2. *Solid Works Russia*: Официальный русскоязычный сайт программных продуктов. URL: <http://www.solidworks.ru> (дата обращения: 11.10.2014).
3. Лаборатория САПР КС УрГУПС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sapr-ks.usurt.ru> (дата обращения: 10.10.2014).

УДК 697.34

Горшков Е. И., Левин Е. И., Микула В. А.  
Уральский федеральный университет,  
[tes.urfu@mail.ru](mailto:tes.urfu@mail.ru)

## ОПЫТ ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ МИКРОРАЙОНА Г. НИЖНИЙ ТАГИЛ

Согласно Федеральному закону от 27 июля 2010 г. № 190-ФЗ «О теплоснабжении», организация развития систем теплоснабжения должна произво-

даться наиболее экономичным способом и удовлетворять спрос на тепловую энергию и теплоносители. В соответствии с требованием закона нами было проведено обследование тепловых сетей одного из микрорайонов г. Нижний Тагил.

Приведем краткую характеристику обследованных тепловых сетей: источник теплоснабжения – котельная. Наружные тепловые сети от котельной до потребителей – двухтрубные. Они обеспечивают потребителей тепловой энергией на нужды отопления и горячего водоснабжения.

В ходе обследования был выявлен ряд проблем и сформулированы предложения по их устранению, а именно:

1. В тепловой сети и в системах теплопотребления абонентов имеются большие сверхнормативные потери тепловой энергии и теплоносителя. Ежегодно их величина растет.

2. Имеющаяся система учета тепловой энергии и теплоносителя не позволяет выявить места утечек и несанкционированного водоразбора.

3. Наиболее вероятная причина сверхнормативных утечек в тепловых сетях – частный сектор. Установка групповых узлов учета на основных ветках тепловой сети и установка общедомовых приборов учета всем потребителям позволит получать оперативную информацию по распределению тепловой энергии по веткам тепловой сети и осуществлять контроль за неучтенным водоразбором. Целесообразно установить четыре групповых узла учета тепловой энергии.

4. В дальнейшем необходимо установить коллективные (общедомовые) приборы учета используемой воды и тепловой энергии. В соответствии с Федеральным законом № 261-ФЗ от 23.11.2009 г. это является обязанностью теплоснабжающей организации.

5. Рекомендуется выполнить отключение участков тепловых сетей с мелкими потребителями с переводом отключенных потребителей на индивидуальное теплоснабжение. Для отключения мелких потребителей необходимо осуществить следующие мероприятия:

- газификация частного сектора (планируется за счет бюджета г. Нижний Тагил);

- заглубление существующих трубопроводов ХВС или прокладка новых (для обеспечения бесперебойной подачи воды в частный сектор);

- отсоединение мелких потребителей от сети с отключением веток с низкой нагрузкой потребителей.

6. Процесс совершенствования работы системы распределения тепловой энергии (тепловых сетей) предлагается разбить на этапы.

*1-й этап.* Создание компьютерной модели с целью определения необходимых конструктивных изменений в тепловой сети, расчета дроссельных шайб (кустовых и индивидуальных) и подбора необходимого насосного оборудования. В компьютерной модели тепловой сети рассмотреть существующую конфигурацию тепловой сети и конфигурацию (модель) с отключенными мелкими потребителями.

*2-й этап.* Для снижения утечек и тепловых потерь через тепловую изоляцию трубопроводов необходимо провести:

- ревизию и замену запорной арматуры;
- замену аварийных участков тепловых сетей, используя при этом предизолированные трубы.

*3-й этап.* Наладка оптимального теплогидравлического режима работы тепловой сети: установка необходимого насосного оборудования (в котельной и на тепловой сети), изготовление и установка шайб, испытание сети и корректировка шайб на «проблемных потребителях».

*4-й этап.* Перевод мелких частных потребителей на индивидуальное теплоснабжение.

На основе обследования была составлена программа по энергосбережению, включающая в себя малозатратные мероприятия с малым сроком окупаемости и мероприятия с крупными капиталозатратами.

Организационные малозатратные мероприятия:

1) Замена тепловой изоляции на современную. Экономия будет достигаться за счет снижения сверхнормативных потерь тепловой энергии через тепловую изоляцию трубопроводов. Затраты составят 900 тыс. руб. Средний срок окупаемости составляет 0,75 лет.

2) Установка групповых узлов учета (необходимо на период до выполнения мероприятия № 4), что позволит получать оперативную информацию по распределению тепловой энергии по веткам тепловой сети и осуществлять контроль неучтенного водоразбора. Затраты – 1000 тыс. руб. Средний срок окупаемости составляет 1,3 года.

3) Наладка оптимального теплогидравлического режима работы тепловой сети позволит сократить потребление электроэнергии за счет снижения расхода сетевой воды. Затраты составляют 1200 тыс. руб. Средний срок окупаемости – 0,5 лет.

К долгосрочным крупнозатратным мероприятиям относятся:

1) Установка коллективных (общедомовых) приборов учета используемых воды, тепловой энергии. Назначение мероприятия – исключение оплаты транспортирующей или теплоснабжающей организации за сверхнормативные утечки в системах теплоснабжения абонентов. Затраты составят 34400 тыс. руб. Средний срок окупаемости – 11,1 лет.

2) Отключение участков тепловых сетей с мелкими потребителями с переводом отключенных потребителей на индивидуальное теплоснабжение. Экономия будет достигаться за счет снижения сверхнормативных потерь тепловой энергии через тепловую изоляцию трубопроводов, за счет снижения сверхнормативных утечек воды из тепловой сети, за счет снижения издержек на замену изношенных участков тепловой сети.

В результате выполнения всех предложенных мероприятий в целом будет повышена надежность и экономичность использования системы теплоснабжения.

## ОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФАКТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ТРУБОПРОВОДАМИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

### *Введение*

В настоящее время все теплоизоляционные материалы, применяемые на магистральных и квартальных тепловых сетях, по ряду параметров проходят сертификацию в лабораторных условиях. Образцы этого могут изготавливаться путем вырубки из готового заводского изделия или отдельно образцы требуемым размерам из тех же материалов, что и сам теплоизоляционный материал. Но так как характеристики заводского образца, готового к установке в тепловых сетях, и лабораторного образца могут отличаться из-за различной геометрии и технологии процесса производства, задача исследования теплоизоляционных материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным, является актуальной на сегодняшний день.

Одним из важнейших показателей работы системы транспорта тепла является величина потерь тепловой энергии. Снижение этих потерь повышает эффективность работы транспортной системы, а значит потребуются сжечь меньшее количество условного топлива, чтобы обеспечить снабжение потребителя необходимым объемом тепловой энергии.

### *Описание установки*

Наиболее полные и объективные показания тепловых потерь можно достичь при моделировании конструкции теплопровода в лабораторных условиях, которая будет воспроизводить его натурную конструкцию в реальных условиях работы в тепловых сетях.

На рис. 1 представлена схема испытываемой конструкции, состоящей из металлической трубы с внешним диаметром 89 мм, на которую одевается испытываемый теплоизоляционный материал; внутри трубопровода помещаются три нагревателя А, Б, В, с регулируемой мощностью, осуществляющие нагрев стенки трубы. Боковые нагреватели А и В служат защитой, охранной зоной для центрального нагревателя Б, тем самым исключая тепловые потери с торцов зоны центрального нагревателя. В результате этого, температурное поле на стыке центрального и боковых нагревателей выравнивается, и измеряемая мощность центрального нагревателя соответствует прямым потерям тепла с данного участка трубопровода.

На металлический трубопровод предварительно перед пуском устанавливаются термопары по всей окружности сечения. Далее крепится слой теплоизоляции по всей длине трубопровода. На поверхность изоляции также монтиру-

ются термопары по всей окружности сечения для точного измерения температуры теплоизоляционного материала (дело в том, что температура поверхности снизу, сбоку и сверху изоляции может различаться).

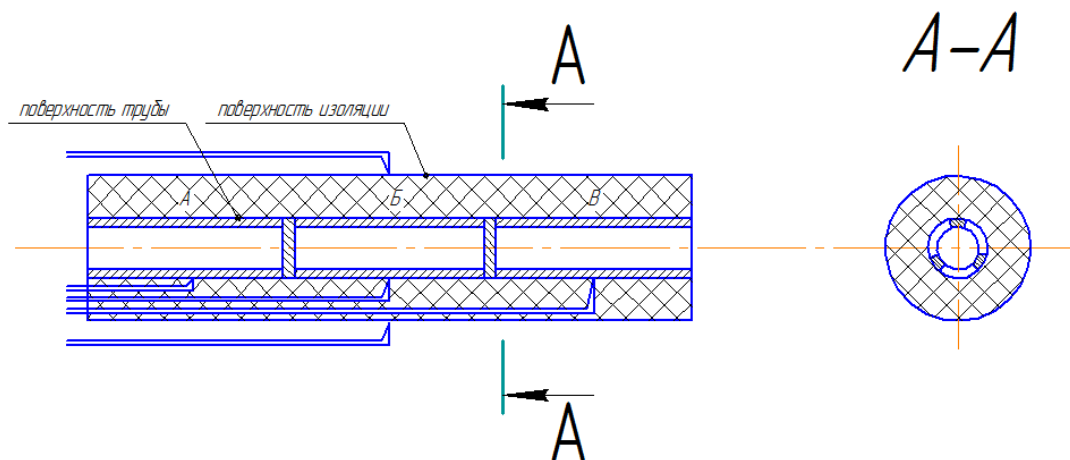


Рис. 1. Схема экспериментальной конструкции

### Экспериментальные результаты

В течение всего периода эксперимента производится запись измеряемых значений линейных тепловых потерь, температур поверхности трубопровода, теплоизоляционного материала и окружающей среды.

Вычисление эффективного коэффициента теплопроводности теплоизоляции определялось из уравнения теплового потока для цилиндрической стенки:

$$q_1 = \frac{(t_{\text{пов}} - t_{\text{из}}) \cdot \pi}{\frac{1}{2} \lambda_{\text{из}} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{внут}}}\right)},$$

путем его преобразования к следующему виду:

$$\lambda_{\text{из}} = \frac{ql \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{внут}}}\right)}{(t_{\text{ст}} - t_{\text{из}}) \cdot 2\pi}.$$

Стационарность теплового режима фиксировалась, когда мощность нагревательного элемента и значения температур поверхностей трубы и теплоизоляции достигали постоянного значения. На рис. 2 представлен процесс испытания пенополиуретановых теплоизоляционных скорлуп толщиной 40 мм. Процесс испытания проходил в три этапа: 1 – период выхода стенда на заданный температурный режим; 2 – период точного регулирования мощности нагревательных элементов; 3 – стационарный режим. Как видно из рис. 2, система регулирования поддерживает температуры поверхностей трубы и изоляции с достаточно высокой точностью, позволяющей достичь стационарного режима. Колебания мощности на втором этапе эксперимента вызваны довольно высокой инертностью системы, они нивелируются системой регулирования.

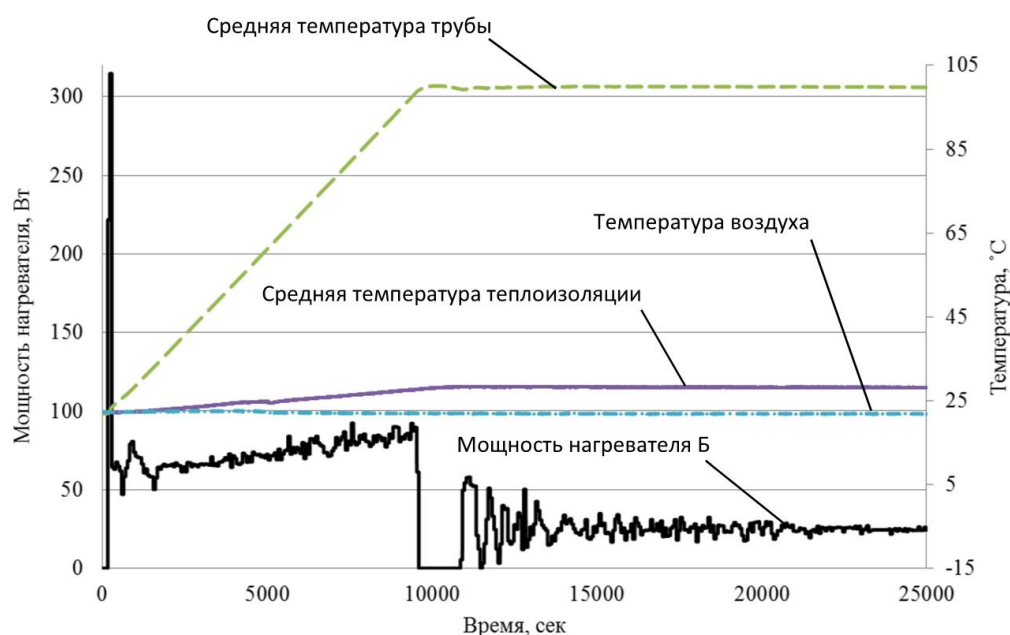


Рис. 2. Значения параметров испытания:

экспериментальные данные стационарного режима:

$\delta = 40$  мм;  $d_{тр} = 89$  мм;  $t_{из} = 28$  °C;  $t_{в-ха} = 22$  °C;  $t_{ст} = 100$  °C;  $q = 25$  Вт/м;  $\lambda_{из} = 0,0355$  Вт/м·К

### Закключение

Точность системы регулирования и возможность установки любой температуры стенки трубы, а также регулирование мощности нагревателей в зависимости от интенсивности процесса теплообмена обеспечивает высокую точность измерений, что подтверждается сопоставлением расчётных данных с экспериментальными.

Таким образом, имея возможность задавать все необходимые параметры сред, оперируя измеряемыми показателями высокой точности и установив мощную систему автоматики, поддерживающую постоянный режим работы, получаем на выходе данные об эффективности и целесообразности использования теплоизоляционного материала. Достигнутое разработчиком установки небольшое время выхода системы в стационарный режим позволяет широко применять данный стенд для сертификационных испытаний теплоизоляционных материалов.

УДК 631.172

Давыдов С. Я., Чикурова О. С., Обухова А. А., Усманов А. И.  
Уральский государственный горный университет,  
ochikur@mail.ru

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ СЕЛЬХОЗРАСТЕНИЙ

Часто ли человек задумывается о том, сколько усилий необходимо растению для того, чтобы вырасти? – Не часто. Этим вопросом занимаются люди,



которые посвятили свою жизнь исследованию, уходу и выращиванию растений. Именно они каждый день работают над тем, чтобы мы с вами могли получить свежие и вкусные продукты по невысоким ценам.

Особенно остро вопрос выращивания овощей и фруктов стоит в районах с неблагоприятными климатическими условиями. Например, выращивание на Урале рентабельной продукции в защищенном грунте с использованием традиционных агротехнологий в условиях продолжающегося роста цен на энергоносители, как показывает опыт, становится проблематичным. В себестоимость одного килограмма свежих овощей, выращиваемых в защищенном грунте в обогреваемых теплицах, 60–70 % уходит на обогрев от общих затрат на единицу продукции.

Так, с наступлением холодов можно заметить на прилавках магазинов продукты, привезенные из других стран, таких как Узбекистан, Польша, Голландия, отличающихся высокой ценой, и не всегда хорошим качеством. Импорт в межсезонье наносит серьезный удар по местным производителям овощей. Стоимость тепла и энергоносителей в структуре затрат на производство овощей на Урале превышает 50 процентов. В ноябре температура воздуха в Польше от 0° до +3° градусов, а в Свердловской области от –10° до –20°. Затраты на обогрев теплиц у нас в разы больше, соответственно и цены выше.

В таблице приведены цены в Польше и Екатеринбурге на 24 ноября 2014 года.

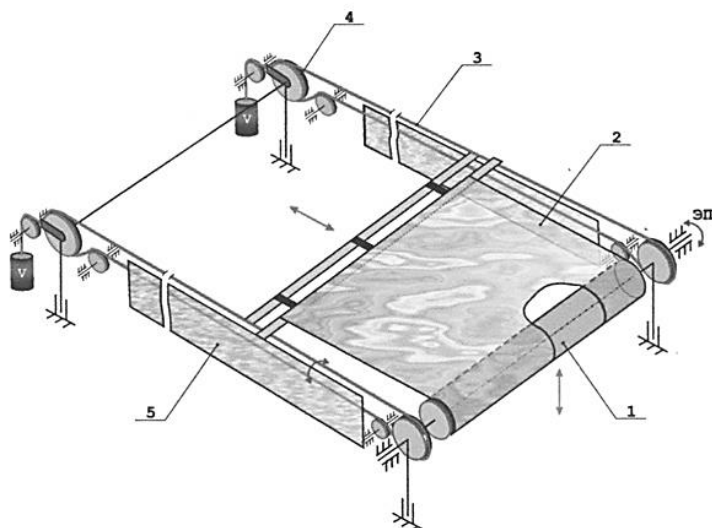
Цены на овощную продукцию

Продукты	Цена в Польше		Цена на Урале, руб.
	евро	руб.	
Огурец	0,88	48,5	89,9
Томат	0,94	51,7	99,9
Салат	0,26	14,5	39,9
Перец болгарский	1,43	78,6	159,9

В условиях резкого удорожания энергетических и транспортных услуг, введения санкций целесообразно рассмотреть вопрос создания устройства, которое поможет снизить затраты на обогрев, уменьшить объем отопляемого пространства и сократить потери тепла.

Установка, показанная на рис., отличается малыми габаритами, легкостью конструкций и простотой обслуживания. Совместное движение тяговых связей гибкого полотна с одновременным вращением приводного и дополнительного барабанов, блоков и шкивов в обе стороны уменьшает динамические нагрузки на полотно, что повышает их долговечность.

Снабжение полотна тягой обеспечивает полотно постоянно натянутое положение, исключает рыхлую намотку, провисание, разрывы, обеспечивает равномерность натяжения полотна по всей плоскости и намотку его на приводной барабан без перекосов и складок, что увеличивает надежность и срок службы устройства. Наличие поддерживающих канатов уменьшает провисание полотна над грядками больших габаритов (до нескольких десятков метров).



Установка для укрытия сельскохозяйственных

Укрытие предназначено для создания парникового эффекта для сельскохозяйственных и рекультивации нарушенных земель. Конструкция устройства представляет собой легкоъемное, сворачиваемое в рулон 1 укрывное полотно 2 с гибкими тяговыми элементами 3, натянутыми на блоки 4. По торцам пленочное укрытие снабжено сворачиваемыми в рулон шторками 5 из полотна. Устройство позволяет регулировать высоту навески полотна вслед растущим растениям.

С помощью устройства создается парниковый эффект для создания ускоренного процесса гниения смесей почвы с продуктами распада. Полотно со стороны почвенных продуктов может быть покрыто химическими реагентами или теплоизлучающими элементами для создания ускоренных химических процессов почвенных смесей.

Область применения. Данным укрывным устройством могут пользоваться не только крупные агрокомплексы и частные предприниматели, но и садоводы, как дополнительным укрытием сельскохозяйственных растений в теплицах при защите от заморозков. Помимо этого, устройство может быть использовано в металлургии для укрытия электролизных ванн. Это позволит сократить потери электролита с зеркала электролизных ванн и улучшить условия труда.

Установка довольно проста в обслуживании. С ее использованием возможно снизить затраты на отопление почти в два раза. За счет того, что укрывной материал не касается растений, уменьшается риск поломки растений. Простота конструкции позволяет изготовить установку из различных материалов.

УДК 662.741.35

Девицкая Н. А., Картавец С. В.  
Московский институт стали и сплавов, Новотроицкий филиал,  
МГТУ им. Г. И. Носова (г. Магнитогорск)  
natalia-devickaya@yandex.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ СУХОГО ТУШЕНИЯ КОКСА В УСЛОВИЯХ ОАО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»

Многие отрасли народного хозяйства располагают резервом топливных и тепловых вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), занимающих значитель-

ное место в их топливно-энергетическом балансе. Наибольшими тепловыми вторичными энергетическими ресурсами располагают предприятия черной и цветной металлургии, химической, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности [1].

Использование вторичных энергоресурсов, неизбежно возникающих в различных технологических процессах, является одним из существенных резервов энергосбережения.

Одно из основных направлений повышения эффективности производства и использования энергетических ресурсов в промышленности – увеличение единичной мощности агрегатов, концентрация производства и создание укрупнённых комбинированных технологических процессов.

На долю черной металлургии приходится около 40 % тепловых и до 80 % горючих ВЭР, применяемых в промышленности.

К ВЭР коксохимического производства относятся:

- теплота раскаленного кокса;
- физическая теплота коксового газа;
- теплота дымовых газов коксовых печей;
- теплота воды систем охлаждения холодильных установок;
- горючие газы и тепловые отходы химических цехов.

Физическая теплота кокса, выгружаемого из камеры, составляет около 50 % от расходуемой на коксование. Ее утилизируют при сухом тушении кокса, т. е. при охлаждении последнего в камере с циркулирующим инертным газом (азотом). Нагревшись до 750–800 °С, газ поступает в теплообменник вторичного теплоносителя (паровой котел, воздухо- или газоподогреватель, подогреватель угольной шихты или сочетание различных теплоиспользующих аппаратов и силовых установок).

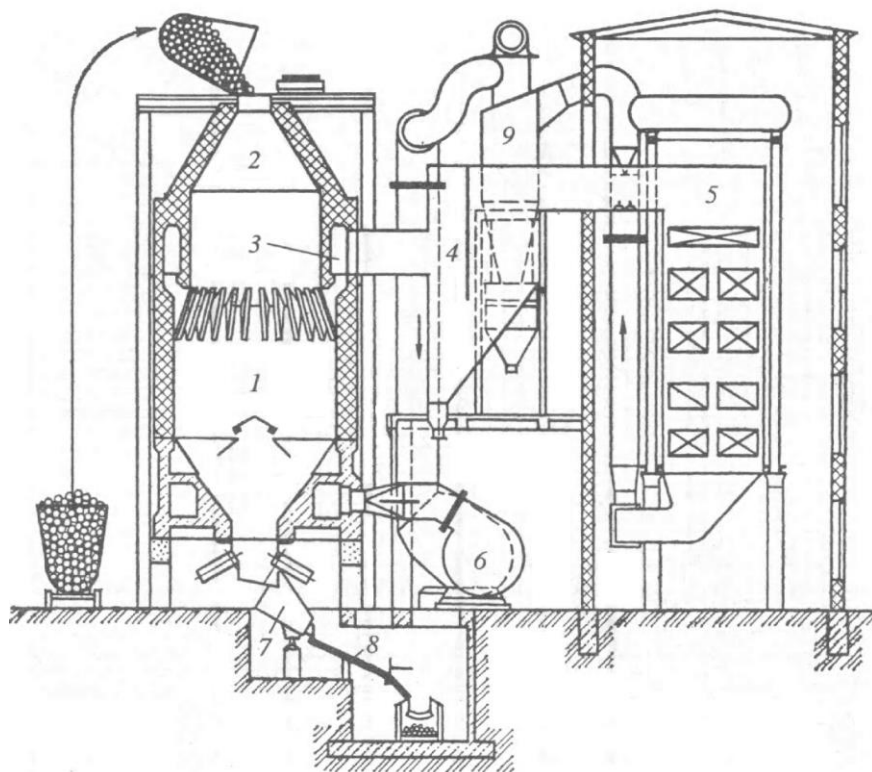
Сухой способ тушения позволяет утилизировать более 80 % теплоты раскаленного кокса.

В ОАО «Уральская сталь» завершилось строительство коксовой батареи № 6. Ввод в эксплуатацию состоялся 30 октября 2014 года. В результате ввода нового объекта будет обеспечена возможность производства высококачественного кокса в объеме около 690 тыс. т в год, что позволит полностью удовлетворить потребности доменного цеха в условиях увеличения мощностей по производству чугуна и отказаться от закупок кокса у сторонних производителей. Пуск коксовой батареи № 6 и использование вторичных энергоресурсов от установки сухого тушения кокса (УСТК) позволит вырабатывать пар для производственных нужд предприятия в объеме до 50 т в час, что очень актуально в условиях дефицита энергоресурса в виде пара на предприятии.

Общая выработка кокса на комбинате составляет 1968 тыс. т/год. С каждого килограмма раскаленного кокса теряется 1860 МДж/т (при теплоёмкости кокса 1,55 и температуре 1200 °С) [2]. Ежегодно эти потери составили бы 3 247 200 МДж, при этом следует отметить, что на комбинате в основном применяется метод мокрого тушения кокса, при котором теряется значительное количество энергии. Наиболее эффективен метод сухого тушения кокса. УСТК

позволяет сэкономить 739 680 МДж, что в переводе на условное топливо составляет 25 245 т у. т. Таким образом, если получать теплоту с 690 000 т кокса, что идет на УСТК, то общая эффективность использования составит 35 %.

На рисунке показан общий вид камерной установки сухого тушения кокса. По этой схеме раскаленный (1000–1050 °С) кокс загружается сверху в бункер, через который непрерывно продувается азот. Теплый кокс (200–250 °С) выдается из нижней части бункера. Нагретый азот направляется в пылеулавливатели, а затем в паровой котел, где получают перегретый до 450 °С водяной пар.



Общий вид камерной установки сухого тушения кокса:

- 1 – камера тушения; 2 – форкамера; 3 – верхний кольцевой канал с зоной косых ходов;  
4 – пылесадительный бункер с перегородкой; 5 – котел-утилизатор; 6 – дымосос;  
7 – разгрузочное устройство; 8 – рампа холодного кокса; 9 – циклоны

Расход азота 75–80 тыс. м<sup>3</sup>/ч. Максимальное количество выгружаемого кокса примерно 80 т/ч [3].

Можно выделить следующие основные преимущества метода сухого тушения кокса:

- 1) значительная экономия тепла;
- 2) улучшаются структурные и прочностные свойства кокса;
- 3) одинаковое содержание влаги по всему объёму массы;
- 4) уменьшение загрязнения воздушного бассейна.

Таким образом, ввод в эксплуатацию коксовой батареи № 6 с установкой сухого тушения кокса позволяет выдавать высококачественный кокс и получать значительное количество энергоресурсов в виде пара, что является перспективным направлением энергосбережения.

#### Список литературы

1. Карабасов Ю. С. Сталь на рубеже столетий. М. : МИСиС, 2001. 664 с.
2. Вегман Е. Ф. Краткий справочник доменщика. М. : Металлургия, 1981. 240 с.
3. Мухин И. Н. Оборудование сухого тушения кокса. Харьков : Книжное изд-во, 1962. 342 с.

УДК 536.7

Дубро А. Е., Жаровцев Р. Д.  
Тюменский государственный архитектурно-строительный университет  
valiyullinaa@yandex.ru

### **ЦИКЛ МАЙСОЦЕНКО. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛА**

Название цикл Майсоценко (М-цикл) получил от своего создателя – доктора наук Валерия Степановича Майсоценко, в настоящее время проживающего в городе Денвер (штат Колорадо, США).

Цикл Майсоценко и области его применения его защищены более чем 200 патентами во всем мире. Впервые технология на основе цикла Майсоценко была доказана и реализована на рынке компанией «*Coolerado Corporation*» (Денвер, Колорадо), производящей несколько типов кондиционеров. Национальной Лабораторией источников возобновляемой энергии США (*NREL*) подтверждено, что кондиционеры, производимые этой компанией, более чем на 90 % эффективнее традиционных систем кондиционирования.

Воздух из области высокого атмосферного давления перемещается в зону низкого атмосферного давления. При искусственном увлажнении воздуха можно создать зону низкого давления, которая, в свою очередь, вызовет появление искусственного ветра. Если при этом разделить сухой и влажный потоки таким образом, чтобы избежать явления массообмена между ними, то такой искусственный ветер будет постоянен. Получив искусственный ветер, мы получим рабочее тело, которое будет выполнять работу по кондиционированию воздуха.

В настоящее время ведутся разработки технологий использования М-цикла для улучшения конструкций градирен электростанций при помощи дополнительного охлаждения, усовершенствований тепловых насосов и водонагревателей, систем охлаждения воздуха на входе в компрессор ГТУ, энергетических башен, подобных башне Заславского, но работающих по М-циклу. Подобные разработки требуют большого количества материальных и интеллектуальных вложений. Хотя эти разработки являются очень многообещающими, но пока существуют только на бумаге.

Вначале необходимо сформировать теоретическую базу, а так как доступ к основной информации о практическом применении цикла закрыт, то для получения достоверных данных необходимо будет провести экспериментальные исследования, предварительно спроектировав и разработав конструкцию экспе-

риментальной установки. Полученные данные позволят спроектировать реальный кондиционер, использующий исследуемый цикл, для работы в климатических условиях Западной Сибири. В данной работе предлагается свой вариант установки, в основу которой положен теплообменный аппарат Майсоценко или НМХ (Heat & Mass Exchange) (рис. 1).



Рис. 1. Принципиальная схема установки

Приведем первоначальные расчеты геометрических параметров наиболее простого варианта теплообменника, работающего по принципу, аналогичному теплообменнику Coolerado.

Атмосферный воздух подается в два отдельных канала, один из которых сухой – рабочий, из него воздух попадает во влажный канал, где насыщается влагой, вследствие чего происходит испарительное охлаждение, и стенки влажного канала достигают температуры, близкой к температуре мокрого термометра, на выходе – уже из влажного канала, мы имеем насыщенный воздух. Во второй канал подается сухой охлаждаемый воздух, его температура понижается до температуры стенки влажного канала, с которой он контактирует, после чего подается в охлаждаемое помещение. Температура на выходе из сухого охлаждаемого канала зависит от его геометрических параметров, необходимо установить, какими должны быть площадь поперечного сечения и длина каналов, для того чтобы сухой воздух успел отдать необходимое количество теплоты через стенку во влажный канал.

Примем исходные данные для проведения расчетов параметров установки, найдем зависимость между длиной канала и температурой охлажденного воздуха. Средняя температура в жаркие месяцы составляет около  $= 30\text{ }^{\circ}\text{C}$  (температура на входе), относительная влажность  $\varphi = 60\%$ , принимаем теплоемкость воздуха  $C_{\text{рв}} = 1,005\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ , а его плотность  $\rho = 1,1665\text{ кг}/\text{м}^3$ . Температура мокрого термометра – это табличное значение, зависящее от температуры  $t_1$  и влажности  $\varphi$ , она равна  $t_{\text{м}} = 21,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура охлажденного воздуха

на выходе будет иметь близкое к  $t_m$  значение,  $t_2 = 21,4$  °С. Примем скорость потока  $v = 10$  м/с, используем канал в форме трубки диаметром  $D = 0,01$  м.

Найдем массовый расход  $M$  в сухом охлаждаемом канале.

$$M = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v \cdot \rho = \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} \cdot 10 \cdot 1,1665 = 0,000916 \text{ кг/с};$$

Рассчитаем количество теплоты  $Q$ , отбираемой у воздуха при охлаждении от  $t_1$  до  $t_2$

$$Q = M \cdot C_{\text{pv}} \cdot \Delta t = 0,000916 \cdot 1,005 \cdot 8,6 = 7,9144 \text{ кВт};$$

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 30 - 21,4 = 8,6 \text{ °С};$$

$$\theta = \frac{\Delta t}{\ln \frac{t_1 - t_m}{t_2 - t_m}} = \frac{8,6}{\ln \frac{8,6}{0,1}} = 1,9257 \text{ °С}.$$

Находим коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D};$$

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,93};$$

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{10 \cdot 0,01}{16,2} = 6242,19,$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха,  $Pr = 0,701$  – число Прандтля,  $\lambda = 0,0267$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности воздуха,  $Nu$  – число Нуссельта,  $Re$  – число Рейнольдса.

$$Nu = 0,021 \cdot 6242,19^{0,8} \cdot 0,701^{0,93} = 16,406;$$

$$\alpha = \frac{16,406 \cdot 0,0267}{0,01} = 43,804 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Найдем площадь поверхности теплообмена  $H$ :

$$H = \frac{Q}{\alpha \cdot \theta} = \frac{7,9144}{43,804 \cdot 1,9257} = 0,093 \text{ м}^2.$$

Отсюда выражаем длину трубки  $l$ :

$$l = \frac{H}{2\pi R} = \frac{0,093}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,005} = 2,99 \text{ м.}$$

На основании полученных данных строим график зависимости  $l - t_2$  (рис. 2).

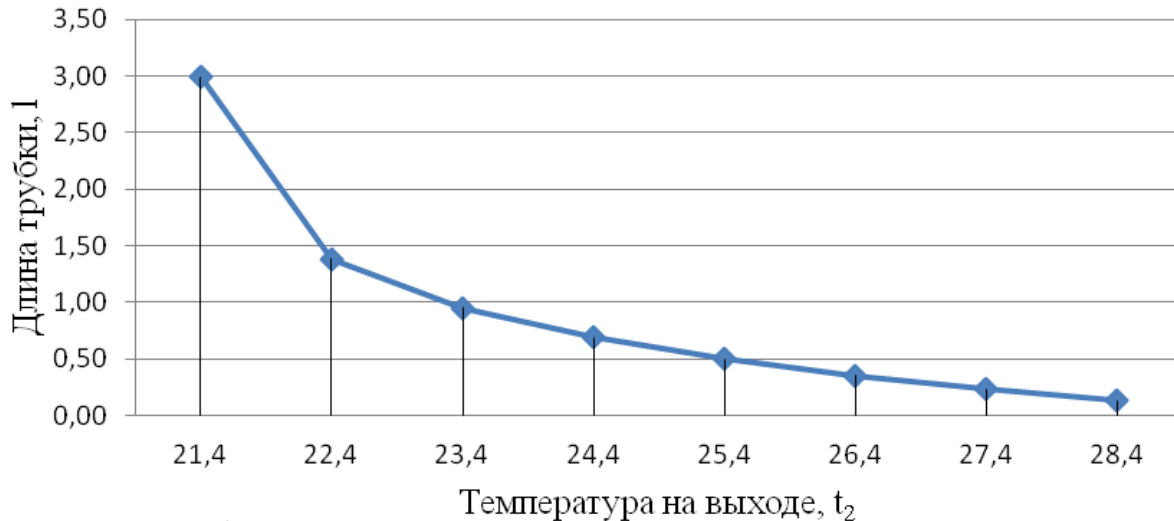


Рис. 2. Зависимость длины трубки от температуры на выходе

Для получения необходимых данных на установке должны быть контрольно-измерительные приборы: термометры на входе и выходе, расходомеры для каждого из каналов, а также расходомер воды, поступающей для увлажнения стенок трубки влажного канала. Принципиальная схема установки контрольно-измерительных приборов представлена на рис. 3.

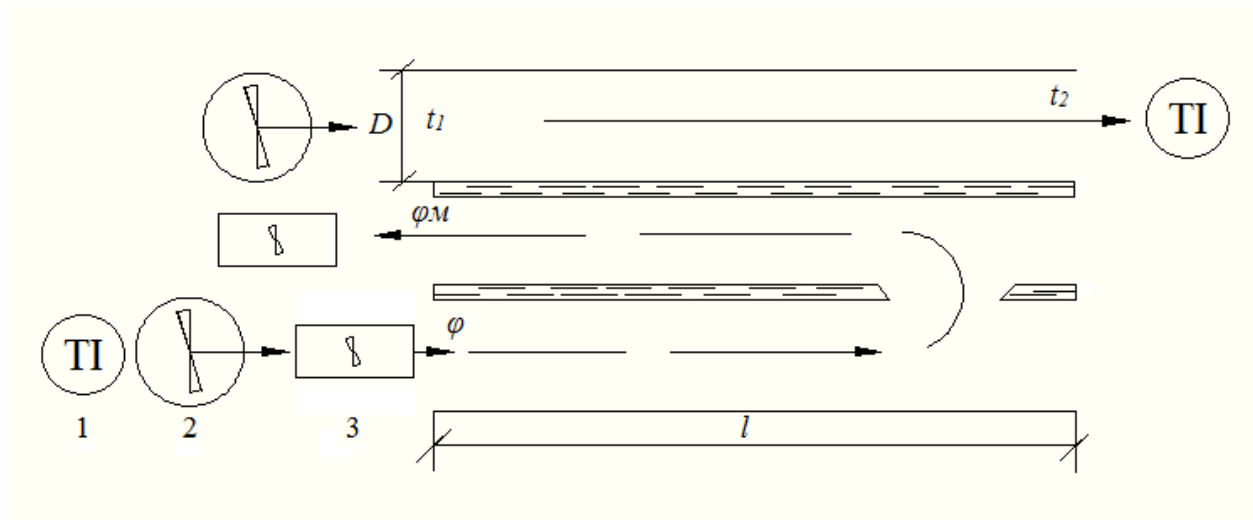


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки:  
1 – термометр; 2 – осевой вентилятор; 3 – расходомер турбинный



В сухой рабочий канал воздух подается с относительной влажностью  $\phi = 60 \%$ , а покидает насыщенным, с  $\phi_n = 100 \%$ . При данной температуре и влажности 60 % кубический метр воздуха содержит 21 грамм воды, при 100 % – около 30 грамм (табличные значения). Соответственно для насыщения от 60 до 100 % необходимо отдать каждому кубометру 9 грамм воды.

$$M = 0,000916 \text{ кг/с};$$

$$V = \frac{M}{\rho} = \frac{0,000916}{1,1665} = 0,000785 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Этот объем воздуха удаляет из системы количество воды  $m$ , равное:

$$m = 0,000785 \cdot 9 = 0,00706 \text{ г/с}.$$

$$m = 0,00706 \cdot 3600 = 25,4 \text{ г/ч}.$$

Таким образом, мы можем получить данные, при анализе которых можно прогнозировать качество работы систем кондиционирования, основанных на подобном принципе в климатических условиях РФ.

В дальнейшем необходимо рассмотреть различные варианты установок – увеличение площади теплообмена за счет оребрения поверхностей, вертикальное и горизонтальное расположение каналов, изучить материалы и выбрать наиболее подходящие. Также можно экспериментировать с использованием компрессоров, нагревательных элементов и осушителей воздуха для контроля влажностей и расходов.

Потенциальные возможности М-цикла еще только предстоит раскрыть, в ходе его дальнейшего изучения и проведения экспериментов.

#### Список литературы

1. Цикл Майсоценко // Горизонт. Денвер, шт. Колорадо, США. № 4 (689). 25 января 2013 г.
2. Халатов А. А. Цикл Майсоценко и перспективы его использования в Украине: материалы Международной конференции «UKR-POWER 2012». Киев, 2012.
3. Трейгер И. Путь к изобилию энергии найден через цикл Майсоценко [Электронный ресурс] // Информационно-аналитическое сетевое издание, 2011. URL: <http://russiandenver.50megs.com/eneriya.htm/> (дата обращения: 27.10.2014).
4. Лемыш А. От этой науки то жарко, то холодно [Электронный ресурс] // Литературно-художественный портал. URL: <http://www.chitalnya.ru/work/814204/> (дата обращения: 31.05.2013).
5. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. М. : Издательский дом МЭИ, 2008. 495 с.
6. Нестеренко А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. М. : Высшая школа, 1971. 170 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ БРИКЕТИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Подробно изучив схему работы котельного агрегата № 4 ОАО «Восточный порт» (поселок Врангель, Приморский край), мы обнаружили большие потери с механическим недожогом топлива. В этой статье мы постараемся раскрыть предлагаемый способ снижения механического недожога и уноса, подробно и аргументированно обосновать его выбор.

Начнем с краткого описания котельной № 4 ОАО «Восточный порт». Теплоснабжение угольного комплекса «Восточный порт» обеспечивается от котельной № 4, оборудованной четырьмя паровыми котлами КЕ-25-14С и котлом КВА-0,65/5 дизельный.

Основными потребителями тепла котельной № 4 являются 4 тепляка (вагоноразмораживающее устройство) с расходом пара № 1, 2–8 т/ч и № 3, 4–10 т/ч.

Котел КЕ-25-14С (рис. 1) поставляется тремя блоками: два топочных блока и блок конвективного пучка. Каждый из боковых экранов (левый и правый) переднего и заднего топочных блоков образует самостоятельный циркуляционный контур. Конвективный блок образован верхним и нижним барабанами, объединенными единым трубным пучком. Очистка пара от влаги производится в сепарационном устройстве, состоящем из отбойных щитков и козырьков, осушающих пар, и окончательно происходит в горизонтальном жалюзийном сепараторе.

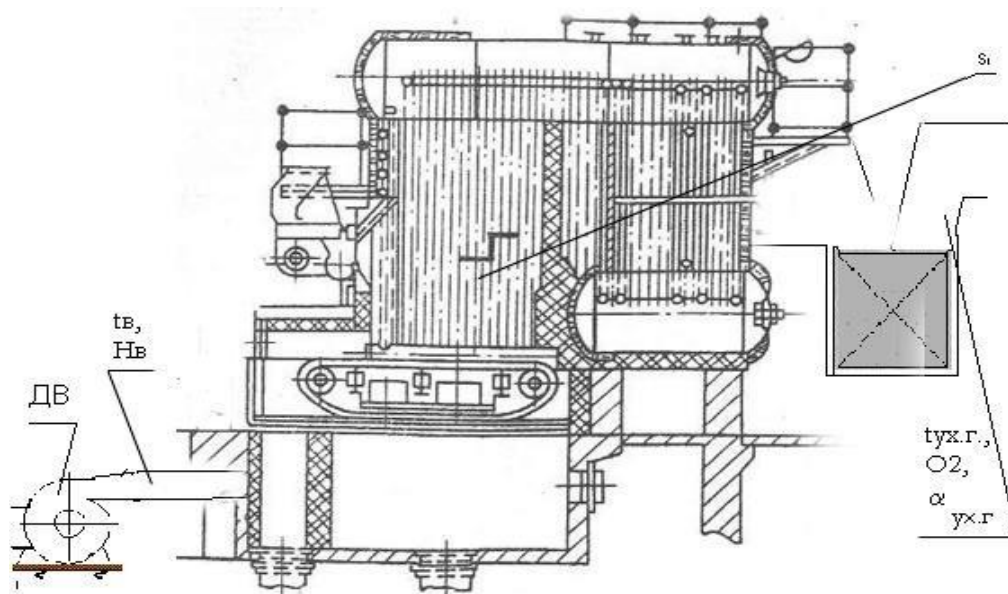


Рис. 1. Котел КЕ-25-14С

В котле применен одноходовый (по воздуху) воздухоподогреватель. При работе на каменных и бурых углях применяется топочное устройство ТЧЗ-2,7/5,6, состоящее из чешуйчатой цепной решетки обратного хода и двух пневматических забрасывателей с пластинчатым питателем.

Эксплуатационный КПД брутто котельного агрегата находится на уровне 68–72 %, что ниже нормативного значения (87 %) на 15–19 %. Удельный расход условного топлива изменяется от 213,31 кг/Гкал до 197,65 кг/Гкал.

Пониженное значение КПД можно объяснить очень высоким содержанием горючих в шлаке (47,3–57,2 %) и уносе (55–57 %), как следствие большим потерям с механическим недожогом.

Потери на уровне 14–19 % можно объяснить большим количеством провала мелкой фракции угля и повышенным количеством уноса пылевидной фракции угля. Основная причина повышенных потерь с механическим недожогом (рис. 2) – несоответствие фракционного состава сжигаемого топлива проектному топливу для котлов КЕ-25-14 (большое количество мелкой и пылевидной фракции). В качестве топлива используется собираемая мелкофракционная россыпь, которая образуется из-за высыпаний при транспортировке и перегрузке угольного топлива на экспорт в перегрузочном терминале.

Потеря тепла от химической неполноты сгорания незначительна и составляет 0,108–0,439 %.



Рис. 2. Потери тепла с механическим недожогом от нагрузки без установки брикетирования котел КЕ-25-14

Потеря тепла с уходящими газами при увеличении нагрузки снижается с 16,49 до 8,26 %.

Потери тепла в окружающую среду через обмуровку снижаются с увеличением нагрузки с 3,04 до 1,43 %.

Результаты испытаний котла показали, что его КПД составил КА № 4 – 66,97–72,28 %, при нормативном значении 87 %.

Основные потери при работе котла – это потери от механической неполноты сгорания топлива. Потери тепла от механической неполноты сгорания  $q_4$ , %, рассчитываются по формуле:

$$q'_4 = 7,83A^{\text{П}} \left[ \frac{\alpha_{\text{пр}} G_{\text{пр}}}{100 - G_{\text{пр}}} + \frac{\alpha_{\text{шл}} G_{\text{шл}}}{100 - G_{\text{пр}}} + \frac{\alpha_{\text{ун}} G_{\text{ун}}}{100 - G_{\text{ун}}} \right].$$

При проведении испытаний потеря от механической неполноты сгорания топлива составила КА № 4 – 13,02–19,12 %.

Высокая потеря тепла с механическим недожогом вызвана нерасчётной крупностью угля, поступающего в котёл (наличием большого количества мелкой фракции). Это приводит к увеличению провала топлива через решётку, а также увеличению уноса частиц, о чём свидетельствует высокое содержание горючих веществ в шлаке и уносе при проведении испытаний. Система возврата уноса с такой крупностью и таким количеством мелкой фракции угля, поступающего в котёл, справиться не может.

В качестве решения проблемы недожога и уноса легких частиц угольной пыли, предлагается подавать уголь, предварительно спрессованный в угольные брикеты (рис. 3).

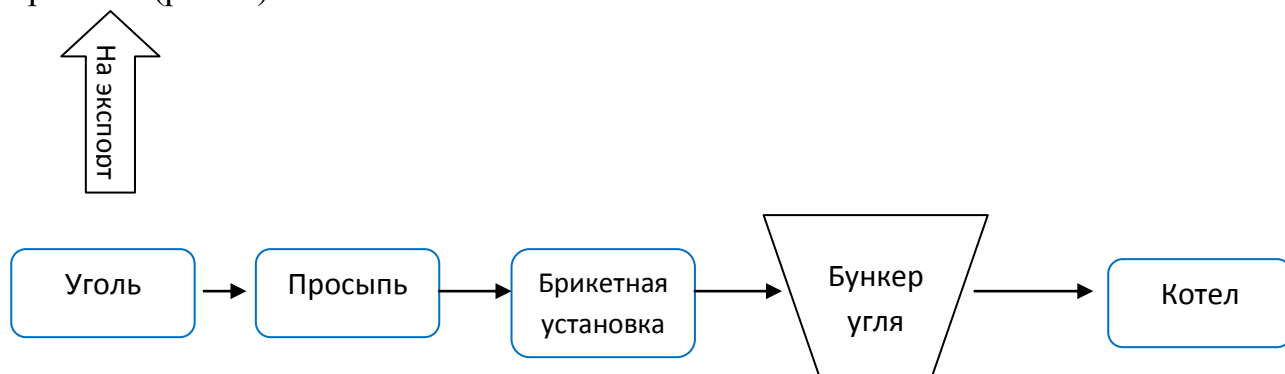


Рис. 3. Схема подачи брикетированного топлива

На котельной № 9 МУПВ ВПЭС (о. Русский, г. Владивосток) смонтирована брикетирующая установка, при использовании которой потери тепла от механического недожога во всем диапазоне нагрузки составят 1,3–4 % (рис. 4).

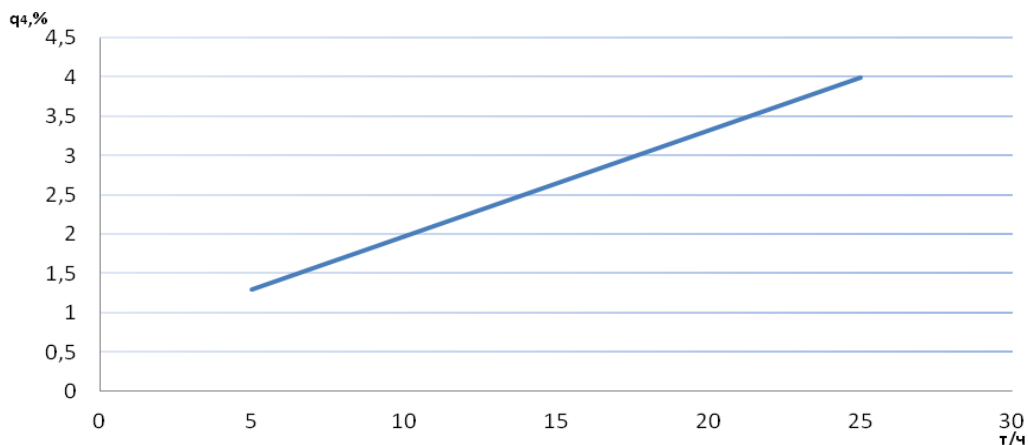


Рис. 4. Зависимость потерь тепла с механическим недожогом от нагрузки котла при внедрении брикетирования

После обработки результатов испытания котлов КЕ-25-14С ст. № 3 и ст. № 4 на брикетированном твердом топливе мы наблюдаем повышение КПД и уменьшение потери тепла от механического недожога топлива, что ведет к повышению энергетической эффективности при сжигании топлива.

УДК 628.98

Егорова Е. С., Кабанов О. А.  
Ивановский государственный энергетический университет,  
ES-1502@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ

Задача исследования заключалась в выявлении зависимости энергоэффективности лампы накаливания от её номинальной мощности.

Предположим, что чем ближе показатель степени в законе Стефана–Больцмана к четырём, тем выше энергоэффективность лампы накаливания. Выясним, при какой мощности лампы его величина будет наиболее близка к показателю степени в законе Стефана–Больцмана, а следовательно, при какой мощности лампы энергоэффективность будет максимальной.

Согласно закону Стефана–Больцмана, энергетическая светимость абсолютно чёрного тела прямо пропорциональна четвёртой степени абсолютной температуры:

$$R = \sigma T^4. \quad (1)$$

Логарифмирование выражения (1) даёт линейную зависимость с коэффициентом пропорциональности, равным 4:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\lg(UI)}{\lg\left(\frac{U}{I}\right)}, \quad (2)$$

где  $\operatorname{tg} \alpha$  соответствует показателю степени в законе (1).

Допущения, принятые для проведения эксперимента:

- нить лампы накаливания является абсолютно чёрным телом;
- вся мощность электрического тока или какая-то постоянная её часть, преобразуется в излучение  $R \sim IU$ ;

– сопротивление нити лампы накаливания пропорционально температуре  $\frac{U}{I} \sim T$ .

В ходе работы были сняты вольтамперные характеристики ламп накаливания различной номинальной мощности (25, 40, 60, 100 Вт) в диапазоне напряжений от 100 до 190 В.

Построены графики зависимости логарифма мощности тока от логарифма сопротивления, нормированные на значения мощности и сопротивления при

напряжении 100 В (рис. 1). Зависимость логарифма мощности тока от логарифма сопротивления с высокой степенью точности описывается линейной зависимостью. Это подтверждает, что энергетическая светимость представляет собой степенную зависимость от абсолютной температуры.

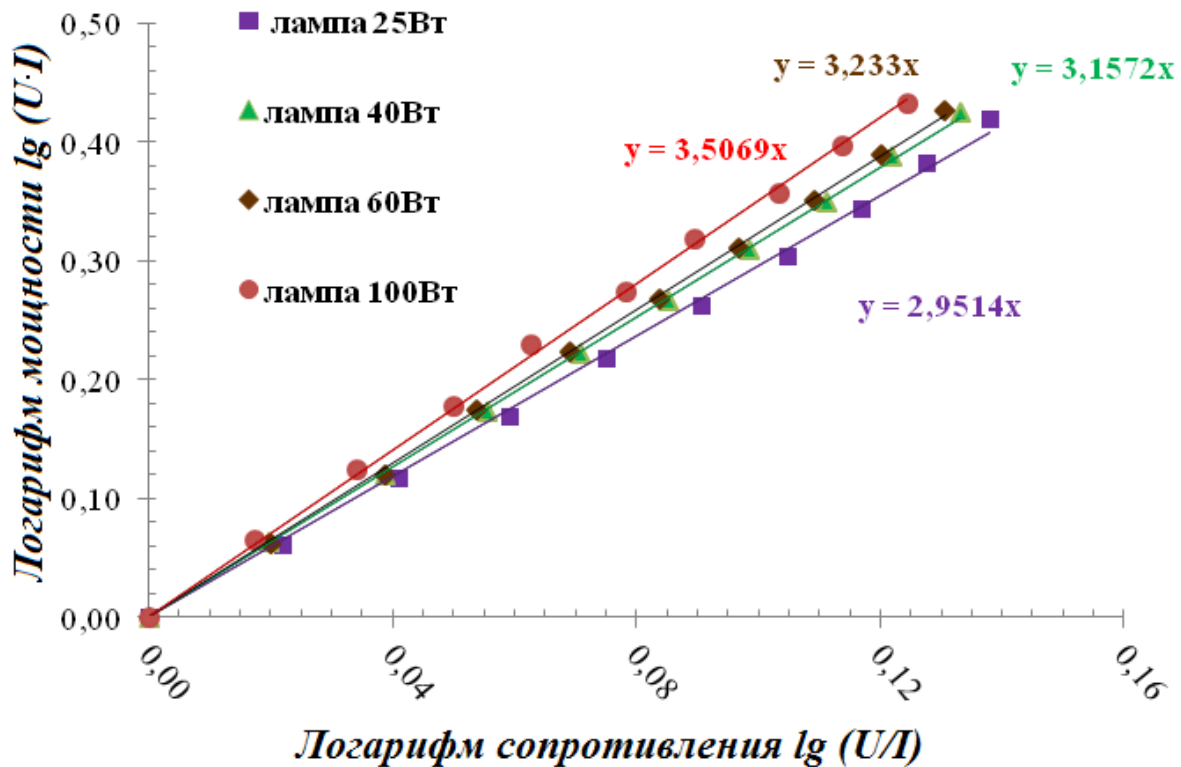


Рис. 1. Зависимость логарифма мощности от логарифма сопротивления, нормированные на значения мощности и сопротивления при напряжении 100 В

Эти прямые располагаются таким образом, что тангенс угла наклона увеличивается с ростом номинальной мощности лампы, полученные значения отмечены на рис. 2.

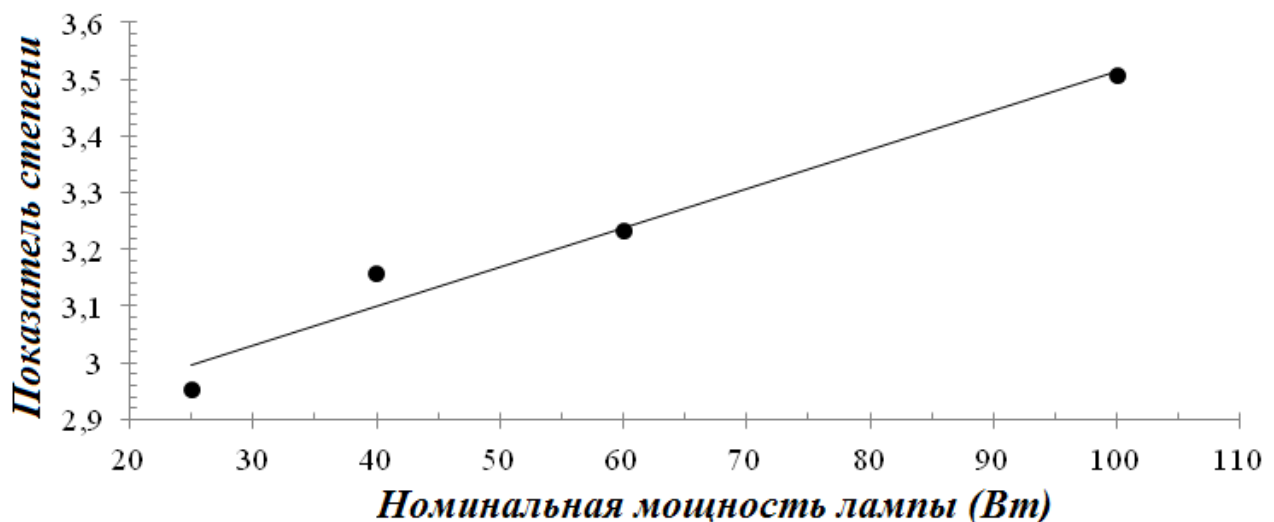


Рис. 2. График зависимости показателя степени от мощности лампы

С ростом номинальной мощности лампы просматривается рост показателя степени (рис. 2) и его постепенное приближение к 4 (прямая линия на графике отображает тенденцию).

Полагаем, что с ростом мощности лампы повышается её энергоэффективность. Среди исследуемых образцов ламп наиболее энергоэффективной оказалась лампа номинальной мощности 100 В (показатель степени в данном случае равен 3,506). Предполагаемая причина такой зависимости связана с геометрическими характеристиками нити лампы накаливания, а именно с отношением поверхности излучающего тела и его объёма.

УДК 628.8

Есаулков В. О., Мухин А. А.  
Уральский политехнический колледж,  
veb1234@e1.ru

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОСВЕЩЕНИЯ СПОРТИВНОГО ЗАЛА**

Нерациональное и неаккуратное использование традиционных источников энергии является одной из главных проблем современности. Однако объёмы традиционных источников энергии сокращаются, а потребность в энергии возрастает, дальнейшее использование этих источников при возрастающем потреблении приводит к тяжёлым, часто необратимым экологическим катастрофам. В сложившейся ситуации необходимо создание и продвижение энерго- и ресурсосберегающих технологий.

Учитывая последние научные разработки в области светотехники, появились объективные условия для продвижения светодиодного освещения. Внедрение светодиодов для освещения различных объектов является одним из энергосберегающих направлений. Для успешной реализации заложенного в светодиодах потенциала необходимо создание условий для научных исследований, технических и технологических разработок светотехнических устройств и продвижения их на рынок.

В предложенном проекте по энергосбережению и энергоэффективности представлено:

- современное энергосберегающее направление светотехники;
- наиболее полное изучение преимуществ светодиодных светильников;
- технико-экономическое обоснование применения современных светодиодных источников света.

С целью выявления энергосберегающего потенциала светодиодных ламп, произведены расчеты по проектированию освещения спортивного зала, размером 25 м × 13 м. Применение светодиодных источников дополнительно позво-

ляет учитывать особенности осветительных систем для спортивных объектов, например, повышенные требования к качеству света. Освещенность помещения выбрана по нормам освещенности для спортивного зала образовательного учреждения – 200 лк. Был проведен расчет существующего варианта освещения спортзала с дуговыми ртутно-люминесцентными лампами (ДРЛ) с мощностью в 250 Вт. Расчет освещения выполнен методом коэффициента использования светового потока [1].



Внешний вид светильника СДС 130-03

По требуемому световому потоку и принципу крепления светильников в спортзале был выбран светильник марки СДС 130-03 (рис.) с потребляемой мощностью 130 Вт, со световым потоком 13 кЛм. Номинальный ток светильника 0,6 А.

Выбранные светодиодные светильники производства ОАО «ММЗ», входящего в структуру «РОСАВИАКОСМОС», рекомендуются для замены традиционных светильников с ртутными (ДРЛ) и натриевыми (ДНаТ) лампами [2].

Светодиодный светильник может быть закреплен на потолок или стену. В данном помещении используются наклонные кронштейны, размещенные по стенам спортзала.

Корпус светильника выполнен из алюминиевого сплава, поверхность анодирована, защитное стекло из ударопрочного оптического поликарбоната.

В соответствии с нормами освещенности для спортзала необходимо установить 12 светодиодных светильников (таблица).

Сравнение светодиодного светильника СДС 130-03 и светильников с лампами ДРЛ-250

Параметры сравнения	Светодиодный светильник СДС 130-03	Ламповый светильник ДРЛ-250
Потребляемая мощность, Вт	130	До 320
Срок службы источника света (светоизлучающего элемента), ч	Не менее 70 000	До 10 000
Использование светового потока (КПД), %	Более 98	30–50
Устойчивость к перепадам напряжения, В	120–270	180–250
Экологическая безопасность	Экологически безопасен	Лампа содержит пары ртути
Специальные условия утилизации источников света	Не требуются	Требуются
Время выхода на рабочий режим освещения источника света	Максимально 1 секунда	От 3 до 15 мин (период разогревания лампы)
Экономия электроэнергии, %	До 60	0



Срок окупаемости светодиодного светильника после замены светильников с лампами ДРЛ составляет 4,5 года. Экономия от использования одного светодиодного светильника за 10 лет эксплуатации составит 42 572,61 руб. При расчете не учитывалась стоимость проводимых работ по замене и утилизации ламп ДРЛ, а также возможность использования кабеля меньшего сечения.

Светодиодные системы освещения для спортивных объектов позволяют достичь высоких показателей освещенности поверхности и равномерности света в зоне соревнований. Это важно для многих видов спорта (большой теннис, футбол, хоккей и др.), где для спортсменов есть необходимость отслеживать быстрые перемещения мяча, шайбы. Также появляется возможность снижения интенсивности света в период дежурного использования спортивных объектов.

Основные преимущества выбранных светодиодных светильников:

- низкое энергопотребление (экономия до 60 %) и высокий КПД = 98 %;
- высокий индекс цветопередачи обеспечивает лучшую видимость и контрастность воспроизведения пространства;
- экологическая безопасность (как при эксплуатации, так и при утилизации изделия);
- устойчивость к перепадам напряжения;
- высокая механическая прочность и виброустойчивость;
- близость освещения к естественному, меньший слепящий эффект и отсутствие мерцания;
- время непрерывной работы светодиода в десятки раз превышает срок службы традиционных источников света;
- отсутствие затрат на обслуживание и срок службы более 8 лет позволит окупить расходы на закупку светильников за 4–5 лет.

#### Список литературы

1. Кнорринг Г. М., Фадин И. М., Сидоров В. Н. Справочная книга для проектирования электрического освещения. СПб. : Энергоатомиздат, 1992. 448 с.
2. Светодиодные светильники СДС «ММЗ» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mmz.ru/products/svet/> (дата обращения: 11.11.2014).

УДК 697.24

Жданова А. Г.  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
Anna682008@mail.ru

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ ЛУЧИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗА**

В настоящее время в связи с введением в действие закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» актуальным

стало использование систем, позволяющих снизить затраты на отопление помещений. Особенно важен вопрос правильного выбора системы отопления для промышленных предприятий, а также для складов, ангаров, спортивных площадок и т. п., для которых применение традиционных систем отопления требует весьма сложного технического решения или вообще невозможно.

На действующих предприятиях реконструкция систем отопления и вентиляции зачастую затрудняется из-за недостаточной мощности имеющихся источников теплоснабжения, поэтому при наличии газоснабжения возможным путем решения теплоэнергетических проблем является использование лучистого отопления с помощью газовых излучателей [1].

При проектировании систем лучистого отопления необходимо производить оценку интенсивности теплового облучения на рабочем месте, как этого требуют действующие нормативные документы и рекомендации.

Инфракрасные лучи называют тепловыми, так как их интенсивность во многом определяется температурой излучающего тела; вторую по важности роль играет состояние его поверхности. Излучение любого твердого тела характеризуется непрерывным спектром распределения энергии излучения по длинам волн, однако сам диапазон излучения является неравномерным и различным для разных твердых тел. Лучшими в гигиеническом отношении являются газовые отопительные приборы (ГЛО) с отводом продуктов сгорания в атмосферу.

На основании вышеизложенного становятся очевидными некоторые преимущества систем ГЛО: высокий КПД; отсутствие градиента температуры помещения по высоте; отсутствие промежуточного теплоносителя и, следовательно, опасности его замерзания; снижение издержек на стоимость приготовления теплоносителя, обслуживания и ремонта теплотрасс; возможность обогрева отдельных зон (участков, линий), в том числе расположенных на открытом воздухе; безынерционное выполнение функций дежурного отопления в ночное время, праздничные и выходные дни, при вынужденном простое; возможность снижения температуры воздуха в рабочей зоне (на 2–5 °С) при сохранении условий теплового комфорта; полная автоматизация процесса горения, возможность программирования температурных параметров; решение проблемы сквозняков (в случае использования «темных» излучателей).

Присутствие в воздухе помещений пыли и аэрозолей, избыточная влажность приводят к изменению спектра пропускания. В связи с этим при проектировании систем ИК-обогрева для конкретных помещений необходимо знать реальную влажность и загазованность в них воздуха, отражательные и поглощательные свойства поверхностей ограждающих конструкций имеющегося оборудования.

Зачастую после принятия нелегкого решения о внедрении инфракрасной системы отопления перед предприятиями встает ряд не менее важных вопросов: с кем работать и какие излучатели ставить? Не нужно забывать, что каждый объект индивидуален. Следует обращать внимание на производственные требования, состояние здания, климат и прочее.

В России только в 1996 г. было разрешено обогревать зоны с постоянными рабочими местами газовыми инфракрасными излучателями (ГИИ), в то время как в США и Европе отопительные системы с использованием ГИИ для обогрева помещений с длительным пребыванием людей начали широко применять уже с конца 1950-х – начала 1960-х гг. Расширение области применения послужило основным стимулом к стремительному росту количества отопительных систем на основе ГИИ в Российской Федерации [2]. Но из-за отсутствия опыта и недостаточной изученности вопроса эти системы применяются нерационально и не приносят снижения затрат и энергосбережения в том объеме, на который способны.

В Европе, например, с целью систематизации накопленных знаний в сфере лучистого отопления было создано научно-техническое объединение производителей излучателей ELVHIS, в которое вошли крупные, зарекомендовавшие себя фирмы. Члены ELVHIS проводят многочисленные исследования, на основе которых осуществляется разработка единых европейских норм. Целиком и полностью использовать подходы к отоплению, определенные зарубежными коллегами, нецелесообразно. Нельзя упускать из вида различия в климатических условиях, особенностях конструкций, в менталитете. Ведь то, что вполне подойдет для подобного здания в Европе, не всегда оптимально для России. Установить какие-то жесткие правила в использовании того или иного вида излучателей в условиях российской действительности тоже крайне сложно: слишком различны температурные перепады, слишком разнообразны помещения, слишком дифференцированы требования к отоплению.

В настоящее время все большее внимание уделяется проблемам энергосбережения и экономии энергоресурсов. Значительная часть потребляемой энергии тратится на отопление зданий, поэтому постоянно ведутся активные поиски наиболее экономичных и эффективных способов отопления. К числу энергоэффективных систем отопления можно отнести системы лучистого отопления, в которых в качестве отопительных приборов используют водяные, электрические или газовые инфракрасные обогреватели [3].

Эффективность лучистого отопления заключается в том, что тепловое излучение пронизывает воздух почти беспрепятственно. Оно становится действенным только при попадании тепловых лучей на твердые тела.

Для получения максимального эффекта от внедрения систем ИК-обогрева необходимо обеспечить генерацию излучения в относительно узком диапазоне длин волн, слабо поглощаемых воздухом.

Достоинства системы ИК-отопления:

- тепловая энергия поглощается предметами и полом;
- нагревается воздух от предметов и пола, создавая вторичную конвекцию, которая создает комфортный температурный режим в области пола;
- горелки инфракрасного излучения при нормальной работе обеспечивают устойчивое беспламенное горение газа. Температура излучателя и тепловая нагрузка должны при этом соответствовать паспортным данным;

– потребляемая мощность системы на ИК-обогревателях снижается на 30–40 % потребляемой мощности конвективной системы;

– энергосбережение происходит за счет снижения температуры воздуха в помещении на 2–3 °С; равномерное вертикальное распределение температуры, что весьма эффективно проявляется при отоплении высоких помещений.

Каждое из перечисленных преимуществ играет системообразующую роль в энергосбережении.

#### Список литературы

1. Родин А. К. Применение излучающих горелок для отопления. Л. : Недра, 1976. 117 с.
2. Рекомендации по применению систем обогрева с газовыми инфракрасными излучателями. М. : АВОК, 2005. 7 с.
3. Шумилов Р. Н., Толстова Ю. И., Помер А. А. Системы лучистого отопления с использованием газа // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: материалы международной научно-технической конференции. М. : МГСУ, 2007. С. 126–130.

УДК 536.24

Желонкин Н. В., Рябчиков А. Ю., Аронсон К. Э., Хае́т С. И.  
Уральский федеральный университет,  
lta\_ugtu@mail.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ТРУБОК ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ТЭС**

Конструкции установленных на ТЭС в схемах паротурбинных установок (ПТУ) теплообменных аппаратов, которые были спроектированы в середине двадцатого века, не соответствуют современным требованиям по надежности, экономичности и экологической безопасности. Поэтому именно в настоящее время, когда срок эксплуатации теплообменных аппаратов устаревших конструкций подходит к концу, их совершенствование и создание новых теплообменных аппаратов ПТУ является актуальным и перспективным.

Применение профилированных трубок рассматривается в настоящее время как один из перспективных путей повышения эффективности теплообменных аппаратов ПТУ. Широкое применение нашли профильные витые трубки (ПВТ) (рис.1, б), которые имеют ряд преимуществ перед другими поверхностями теплообмена: хорошая изученность этих трубок; отлаженная, достаточно простая и недорогая технология изготовления трубок; повышение интенсивности теплопередачи в аппаратах с такими трубками (на 15–40 %) в сравнении с гладкотрубными теплообменниками; допустимое в большинстве случаев увеличение гидравлического сопротивления аппарата (до 80 %) и т. д. Дальнейшим развитием данного типа поверхности теплообмена с винтовой накаткой является предложенная авторами поверхность теплообмена со встречной накаткой (ТВН) (рис. 1, в, патент на полезную модель 112752 РФ). Проведенные экспе-

риментальные исследования на трубке со встречной накаткой (ТВН) показали её повышенную эффективность.

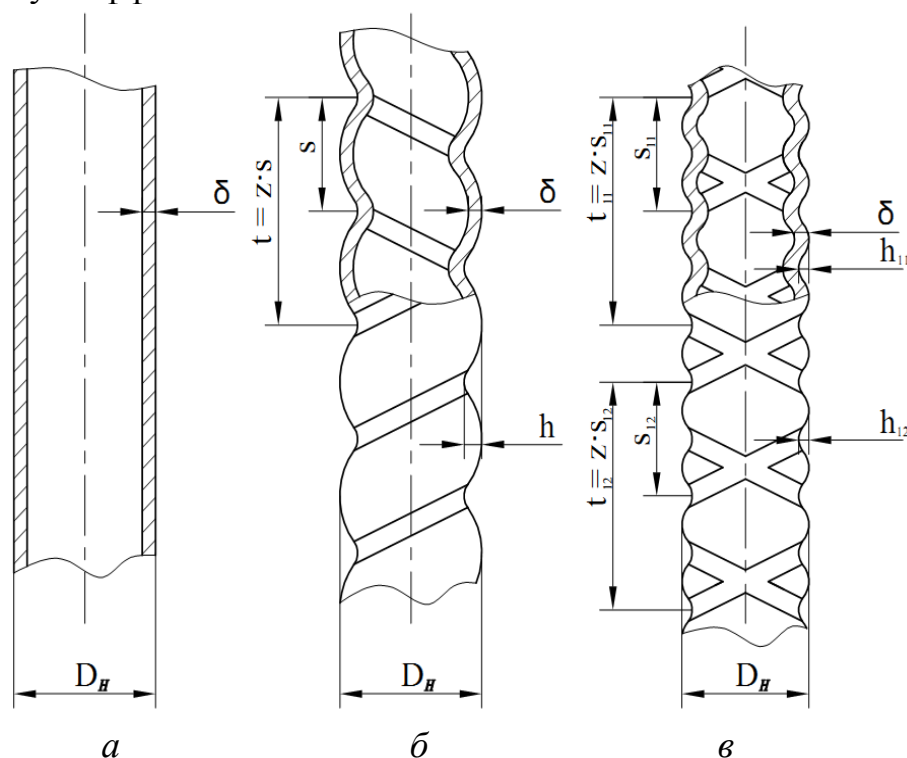


Рис. 1. Профильные трубки: *а* – гладкая трубка, *б* – профильная витая трубка (ПВТ), *в* – трубка со встречной накаткой (ТВН):  $h$ ,  $h_{11}$ ,  $h_{12}$  – глубина канавки, мм;  $s$ ,  $s_{11}$ ,  $s_{12}$  – шаг между соседними канавками, мм;  $z$  – число заходов профилирования;  $\delta$  – толщина стенки трубы;  $D_{\text{н}}$  – наружный диаметр трубы

ПВТ изготавливаются из гладких трубок на специальном станке методом планетарной обкатки, закреплённой от вращения гладкой трубки тремя формирующими фасонными роликами малой толщины, которые устанавливаются под требуемым углом к оси заготовки и вдавливаются в неё на необходимую глубину. При этом на наружной поверхности трубки образуются винтовые канавки, а на внутренней – соответствующие им выступы. ПВТ изготавливается с правой накаткой и шагом между соседними канавками  $s = 8$  мм. При изготовлении трубок ТВН производится дополнительное профилирование ПВТ (правая накатка  $s_{12}$ ) левой накаткой с необходимым шагом  $s_{11}$ .

Применение профильных витых трубок конструкции УрФУ в теплообменных аппаратах ТЭС прошло многолетнюю апробацию в энергетике (рис. 2) и зарекомендовало себя как надежный метод повышения их эффективности.

Опыт модернизации значительного количества теплообменного оборудования ПТУ показал, что совершенствование серийных аппаратов, отработавших свой ресурс, путем замены трубных пучков на трубные системы с ПВТ целесообразно, поскольку при вышедших из строя и морально устаревших трубных пучках аппаратов их корпуса остаются, как правило, в удовлетворительном состоянии. А использование штатного корпуса (и в ряде случаев и водяных камер) серийного аппарата при установке в него современной трубной системы позволяет избежать дополнительных затрат на согласование и реализацию новой компоновки теплообменника (обвязка трубопроводами). Кроме того, стои-

мость модернизации с использованием штатного корпуса существенно снижает общие затраты на модернизацию.

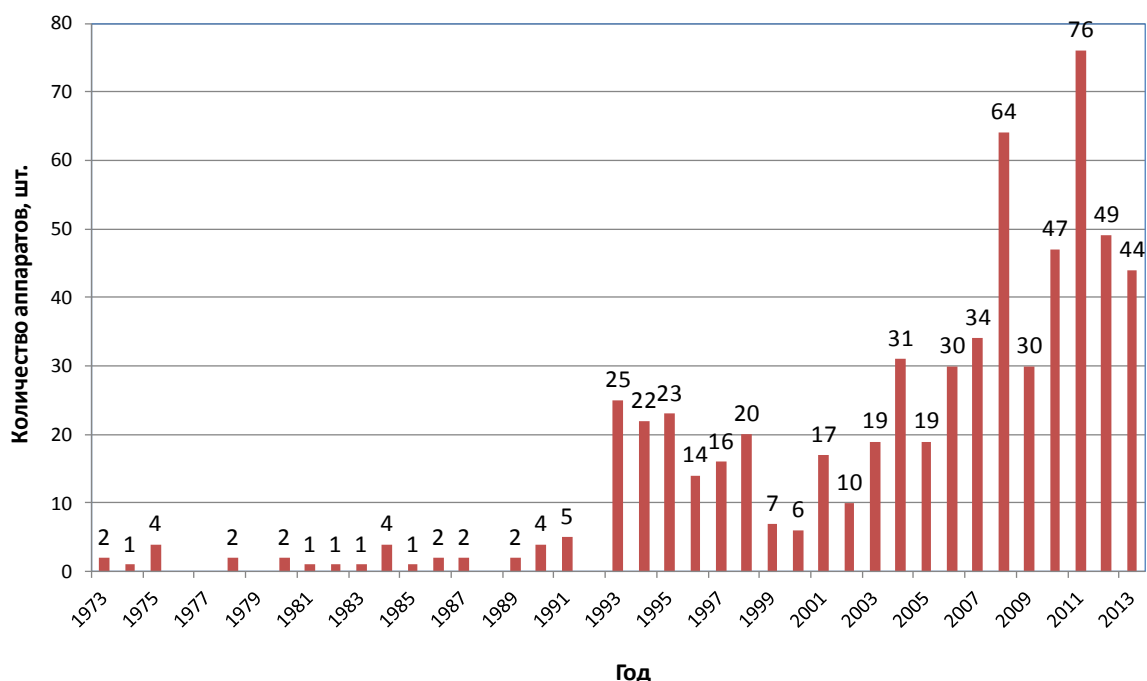


Рис. 2. Ретроспектива применения профильных витых трубок конструкции УрФУ при модернизации теплообменного оборудования ПТУ ТЭС

По проектам УрФУ изготовлено и модернизировано более 600 теплообменных аппаратов (рис. 3) для турбоустановок мощностью от 6 до 800 МВт на 45 ТЭС Российской Федерации. Проектирование модернизированных теплообменников основывается на уточненных или разработанных авторами уникальных методиках вибрационного и теплогидравлического расчетов, позволяющих реализовать максимально эффективные и надежные конструкции.

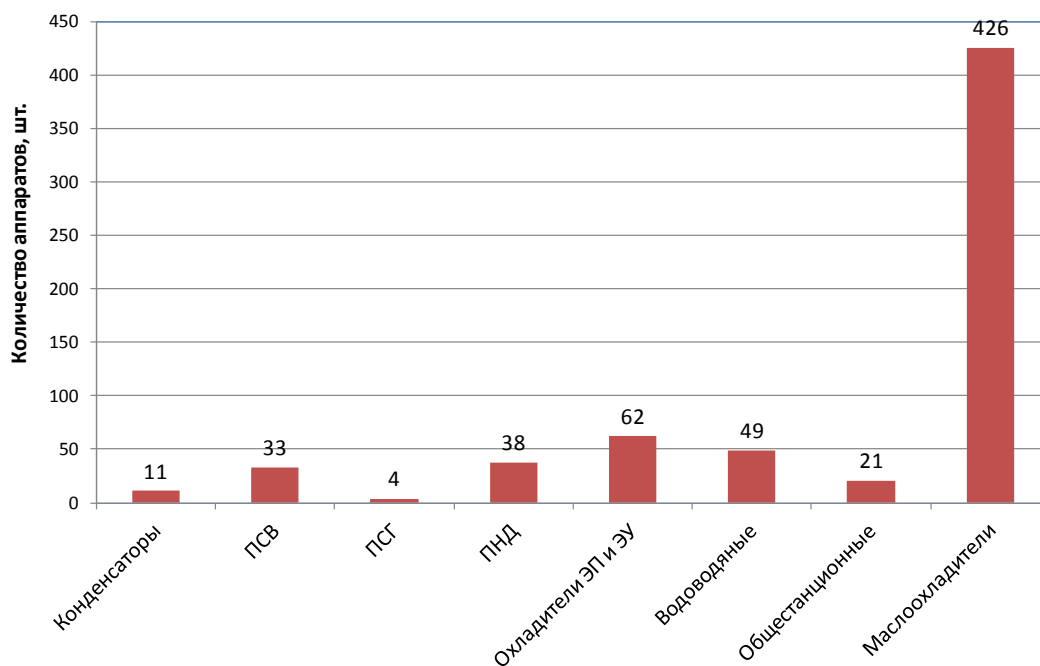


Рис. 3. Теплообменные аппараты, модернизированные по проектам УрФУ и работающие в различных технологических подсистемах ТЭС

Опыт эксплуатационного персонала ТЭС, где установлены аппараты с ПВТ, подтверждают результаты промышленных испытаний.

Решение вопроса о целесообразности применения ПВТ в конкретных теплообменных аппаратах ПТУ должно приниматься только на основе технико-экономического анализа для всей турбоустановки в целом.

Представленные в данной статье исследования проводились в рамках выполнения НИОКР по заданию Министерства образования и науки РФ, тема «Повышение эффективности и надежности теплообменного оборудования энергопотребляющих и энергогенерирующих установок».

УДК 621.928.3

Замалиева А. Т.<sup>1</sup>, Зиганшин М. Г.<sup>2</sup>  
ООО «Газпром трансгаз Казань»<sup>1</sup>, КГАСУ<sup>2</sup>(г. Казань)  
Albina-0587@rambler.ru<sup>1</sup>, mjihan@mail.ru<sup>2</sup>

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОННЫХ УСТРОЙСТВ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ

Одна из наиболее актуальных современных проблем – локальные загрязнения атмосферы промышленными выбросами. Чтобы пылегазовые загрязнители выбросов, накапливаясь в атмосфере, не создавали концентраций сверх предельно допустимых, производится двух- или многоступенчатая очистка выбросов в газоочистных устройствах [1].

В данной работе рассматривается эффективность обработки промышленных выбросов при помощи циклонного фильтра [2] – аппарата, совмещающего первичную и окончательную ступени улавливания взвешенных частиц.

Опытный образец элемента циклонного фильтрующего аппарата испытан на стенде по схеме (рис. 1).

Запыленный поток из контейнера поступал тангенциально в циклонный элемент 1. На фильтре 2 и стенках циклона происходило инерционное осаждение пыли, затем поток попадал в выходную трубу циклона. На входной фильтрующей вставке 2 улавливается около 75 % пыли, на стенках оседает 20 %, остатки задерживаются выходным фильтром из ткани Петрянова 7.

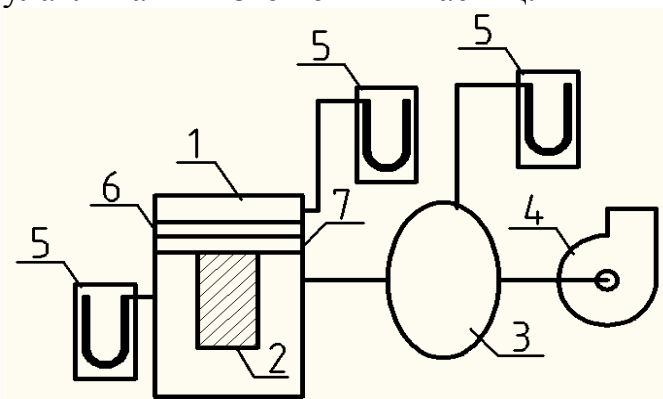


Рис. 1. Стенд для испытания фильтрующего циклонного сепаратора:

1 – циклон; 2 – тканевый фильтр; 3 – контейнер с пылью; 4 – нагнетатель; 5 – U-образные манометры; 6 – патрон с сеткой; 7 – ткань Петрянова

Дальнейшее совершенствование конструкции проводится на основе численного моделирования методами вычислительной гидродинамики (*Computational Fluid Dynamics*).

Построена численная 3d-модель циклона ЦН-15 диаметром 500 мм. В соответствии с рекомендациями [3, 4] принята модель осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation, RANS*), при исходном ламинарном течении. Использование осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса требует намного меньше вычислительных ресурсов по сравнению с другими моделями. В рамках *RANS* моделируется вклад в среднее движение всех масштабов турбулентности. Для определения скорости и давления потока по сечениям циклона проведены расчеты при входной скорости потока от 3,5 до 20 м/с. Снижение скорости происходит около стенок циклона. Максимум значения скорости наблюдается на выходном сечении. На рис. 2–4 представлены эпюры скорости и давления в продольном сечении модели при скорости 3,5 м/с и показаны расположения поперечных сечений.

Сечение 1–1 – это кольцевая зона в продольном сечении циклона, 2–2 – поперечное сечение на входе циклона; 3–3 – поперечное сечение на выходе потока из кольцевой зоны циклона.

После тангенциального входа поток газа приобретает в корпусе циклона осесимметричное винтовое движение вниз. После кольцевой зоны вертикальная составляющая скорости потока вблизи стенки корпуса при перемещении вниз начинает уменьшаться из-за роста давления в сужающейся конической части циклона.

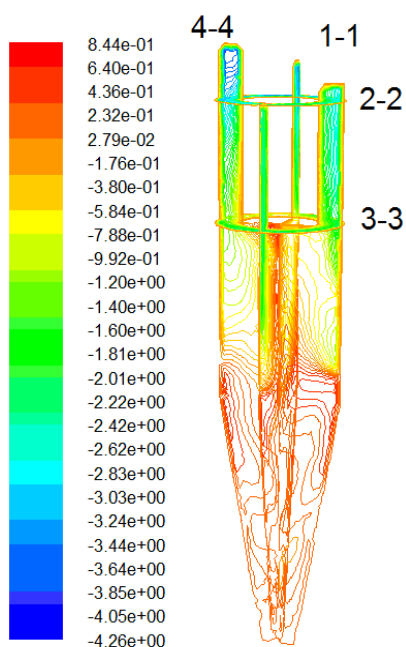


Рис. 2. Распределение тангенциальной скорости потока в пределах кольцевой зоны циклона

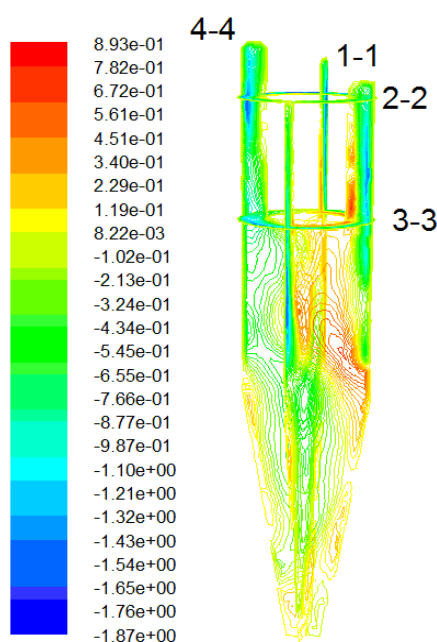


Рис. 3. Распределение осевой скорости потока в пределах кольцевой зоны циклона

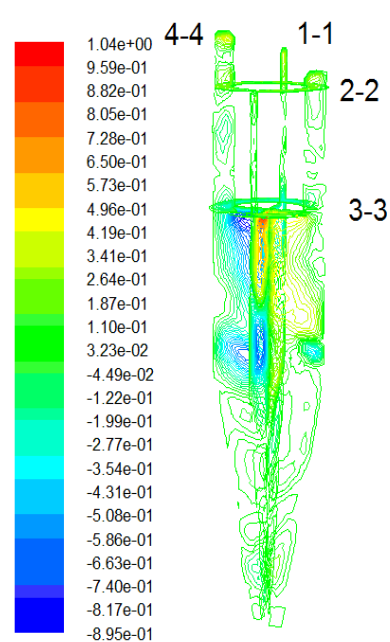


Рис. 4. Распределение радиальной скорости



На рис. 5 представлены изменения тангенциальных составляющих скоростей и статического давления в нескольких поперечных сечениях циклона.

Во всех сечениях в периферийной части потока наблюдается увеличение тангенциальной составляющей скорости по радиусу по мере удаления от стенок циклона. Давление падает по радиусу к центру циклона, достигая минимума на оси вращения. По результатам расчетов можно с достаточной для практических целей точностью определить разрежение, которое устанавливается в пылесборном бункере циклона.

На периферии циклона профили тангенциальной скорости накладываются, а при приближении к выходному отверстию – расходятся.

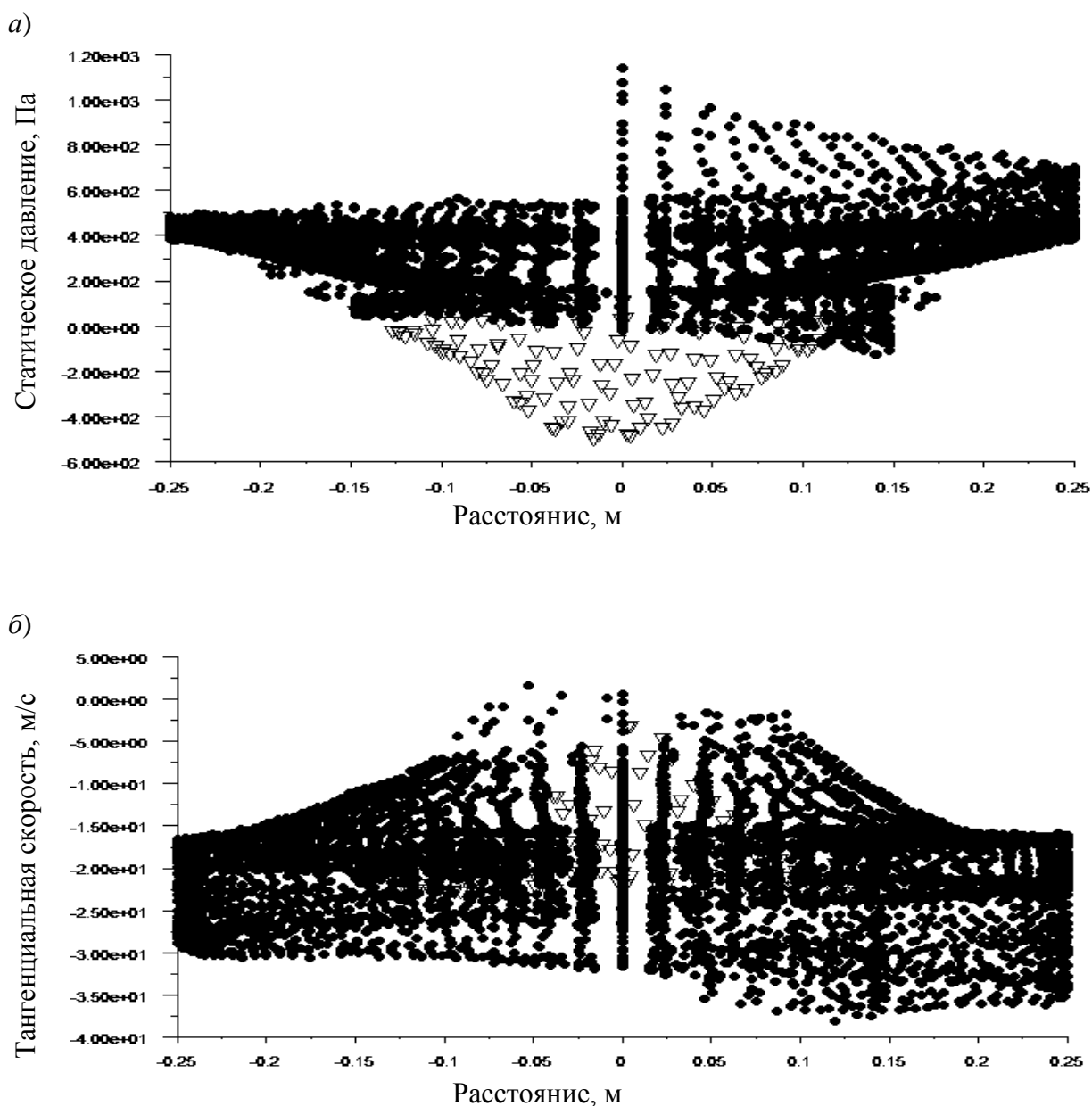


Рис. 5. Изменение статического давления а) и тангенциальной скорости б) внутри циклона. Значками  $\nabla$ ,  $\bullet$  обозначены физические параметры соответственно во входной и центральной частях циклона

Внедрение разработки позволит достичь увеличения пропускной способности очистных аппаратов в 4 раза при повышении качества очистки газа, которое выражается в уменьшении размера частиц, улавливаемых на 50 % (диаметра отсекаания), со средних для циклонов значений 5–10 мкм до 0,4 мкм. Указанное улучшение качества очистки не требует дополнительных затрат энергии, что является одним из преимуществ перед аналогами: в существующих конструкциях циклонов уменьшение диаметра отсекаания на 0,1 мкм после 1 мкм требует не менее чем 15 %-го увеличения затрат энергии. В предлагаемом проекте затраты энергии, связанные с увеличением оптимальной скорости обработки потока с 2–5 м/с до 20 м/с, обеспечивают рост производительности единицы оборудования. При этом практически устраняется проблема абразивного износа корпуса.

#### Список литературы

1. Ватин Н. И., Стрелец К. И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон. СПб. : СПбГТУ, 2003. 65 с.
2. Циклон-фильтр: пат. 2361678 РФ / Зиганшин М. Г., Алещенко И. С., Павлов Л. В., Зиганшин А. М., опубл. 20.07.2009. Бюл. № 20.
3. Hoffmann A. and Stein L. Gas Cyclones and Swirl Tubes. Berlin, Heidelberg, N. Y. : Springer-Verlag, 2002. 422 p.
4. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М. : Физматлит, 2008. 368 с.

УДК 622.7

Запарнюк М. Н., Нешпоренко Е. Г.  
Магнитогорский государственный технический университет  
mixaz@list.ru, neshporenkoeg@mail.ru

## **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ СИДЕРИТОВЫХ РУД**

Современные предприятия черной металлургии, базирующиеся на аглококсодоменой технологии, всё больше сталкиваются с проблемой нехватки железорудных и энергетических ресурсов. Существующие руды, альтернативные классическим железным рудам, такие как сидеритовые и титаномагнетитовые, по своим физико-химическим характеристикам не могут быть широко введены в действующее металлургическое предприятие.

В настоящее время разными научными группами ведутся активные исследования в области переработки сидеритовой руды, запасы которой, например, только в Челябинской области составляют около 1 млрд т. Руда представляет собой сложный комплекс минералов, в основной состав которого входят соединения железа и магния, как правило, в виде карбонатов.

Одним из способов обогащения сидеритовой руды является её обжиг, который реализуют в шахтных печах с применением природного газа (ПГ) при

температуре 700 °С [1]. Поскольку температура горения ПГ превышает 2000 °С, сжигание ПГ ведут с большим избытком воздуха, из-за чего высокотемпературный источник тепловой энергии используется с низкой эффективностью. В процессе обжига потребляется значительное количество природного газа – 38 м<sup>3</sup>/т, при этом на размол и магнитную сепарацию тратится более 50 кВт·ч/т электроэнергии. Теплота отходящих продуктов сгорания с температурой 700 °С теряется в окружающую среду, а сам процесс характеризуется низкой удельной производительностью.

Одним из способов интенсификации процесса обжига руды является обработка её при более высокой температуре [2]. Переход на температурный уровень процесса обжига в 1200 °С привел к образованию твердого соединения FeO·MgO, обладающего сильной молекулярной связью. Восстановление железа из такого соединения классическими восстановителями (кокс, природный газ и уголь) при данной температуре термодинамически невозможно, поэтому снова прибегают к химическим методам их разделения, а также ограничивают применение в доменной теплотехнологии получение чугуна из-за образования тугоплавких шлаков.

Таким образом, поставлена задача определения термодинамических температур переработки сидеритовой руды, при которых будет иметь место жидкоподвижный шлак, и созданы условия восстановления только железа. Оксид магния останется в жидкоподвижном шлаке.

Сидеритовая руда Бакальского месторождения имеет комплексный состав, включающий в себя основные компоненты: FeCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, MnO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S и пустую пористую породу. В таблице представлены температуры плавления наиболее распространенных в руде оксидов [3].

Температуры плавления материалов	
Вещество	Температура плавления, °С
FeO	1370–1420
MnO	1785
MgO	2800

Из таблицы видно, что для полного перевода руды в расплав необходимо ее нагреть до температуры 2800 °С. Процессы, протекающие при такой температуре, относятся к низкотемпературным плазменным технологиям.

При проведении высокотемпературного процесса обжига сидеритовой руды образуются следующие компоненты: Fe – 55 %, FeO – 30 %, MgO – 12 %, S – 0,02 %, при этом температура плавления образующихся шлаков составляет около 2500 °С. Поскольку данный температурный уровень неприемлем для действующей технологии, необходимо его понизить. Добавками, снижающими основность руды, соответственно и её температуру плавления, являются CaO, SiO<sub>2</sub> и др.

Расчет показал, что при введении дополнительного количества CaO – 100 кг на тонну руды и SiO<sub>2</sub> – 1950 кг на тонну руды образуются шлаки с температурой плавления, равной 1500 °С [4], что технически приемлемо для веде-

ния процесса. С помощью термодинамической диаграммы [3] зависимости изобарного потенциала образования оксидов от температуры, определена температура 2270 °С, при которой начинается восстановление магния из расплава, что в данных условиях не желательно.

Таким образом, диапазон рабочих температур для термодинамически идеального процесса восстановления железа из расплава сидеритовой руды составляет 1500–2270 °С. Если рабочая температура опустится ниже этого диапазона, то образующиеся при восстановлении шлаки станут более вязкими, начнется процесс кристаллизации. При повышении температуры обрабатываемого материала выше верхнего предела в рабочей зоне создадутся условия, при которых интенсифицируется процесс восстановления магния.

Процесс переработки сидеритовой руды требует значительного количества тепловой энергии, поэтому разработка энергоэффективной тепловой схемы процесса является дальнейшей актуальной задачей.

#### Список литературы

1. Комплексная переработка сидеритовых руд с высоким содержанием оксида магния : сб. материалов VIII конгресса обогатителей стран СНГ / Бессмертных А. С., Бигеев В. А., Ключковский С. П., Смирнов А. Н. М. : МИСиС, 2011. Т. 1. С. 70–72.
2. Физико-химические свойства окислов: справочник / Самсонов Г. В., Борисова А. Л. [и др.]. М. : Металлургия, 1978. 472 с.
3. Вегман Е. Ф. Краткий справочник доменщика. М. : Металлургия, 1981. 240 с.
4. Атлас шлаков : справ. изд. / пер. с нем. Г. И. Жмойдина / под ред. И. С. Куликова. М. : Металлургия, 1985. 208 с.

УДК 621.311.22

Захаров Р. В., Калмыкова Е. А., Картавцев С. В.  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
zaharovrom@gmail.com

## **ЧИСТАЯ УГОЛЬНАЯ ТЭЦ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ АЭРОШЛАКОВОГО РАСПЛАВА**

Технология сжигания угля, применяемая на современных промышленных предприятиях, а именно пылеугольное сжигание угля и сжигание угля в кипящем слое, обладает рядом недостатков. К главным недостаткам относятся золошлакоотвалы и унос золы в атмосферу.

В золошлаковых отвалах содержатся такие вещества как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  (основные компоненты при производстве цемента) и многое другое. Периодически возникают проекты по переработки отвальных материалов. Для получения полезных и нужных материалов, вроде цемента, железа и прочих компонентов, затрачивается топливо для достижения температурного уровня нужных параметров. А существует ли способ получения строительных материалов и минимизации выбросов золы, минуя золошлакоотвалы?

Именно чистая угольная технология сжигания угля в аэрошлаковом расплаве (АШР) может ответить на этот вопрос. АШР связывает летучие компоненты в раскаленном шлаке, что минимизирует выброс золы в атмосферу. Получение строительных материалов возможно непосредственно в АШР при добавлении извести. Немаловажным фактом является то, что из угля происходит извлечение железа. Один из ярчайших плюсов аэрошлакового расплава является возможность использования низкосортных углей.

Для расчетов были взяты данные по углю Коркинского месторождения (г. Челябинск). Задающим значением стала отопительная нагрузка города Магнитогорск [1]. В результате расчетов составлена схема ТЭЦ, основанная на АШР. Она представлена на рисунке.

В ходе расчетов для избежания образования золошлаковых отходов были изучены свойства углей Урала, выполнен расчет по определению основности и количества извести, которое необходимо добавить для получения золы с основностью, равной единице, для отведения металла из получаемой золы [2].

Расход угля для теплофикационных нужд и для производства извести дан в килограммах условного топлива. Расчет показывает, что использование твердых бытовых отходов (ТБО) в качестве топлива дает положительные эффекты, также технология аэрошлакового расплава способна в полной мере использовать уголь, т. е. как его минеральную часть, так и теплоту сгорания, минимизировав отрицательное воздействие на окружающую среду.

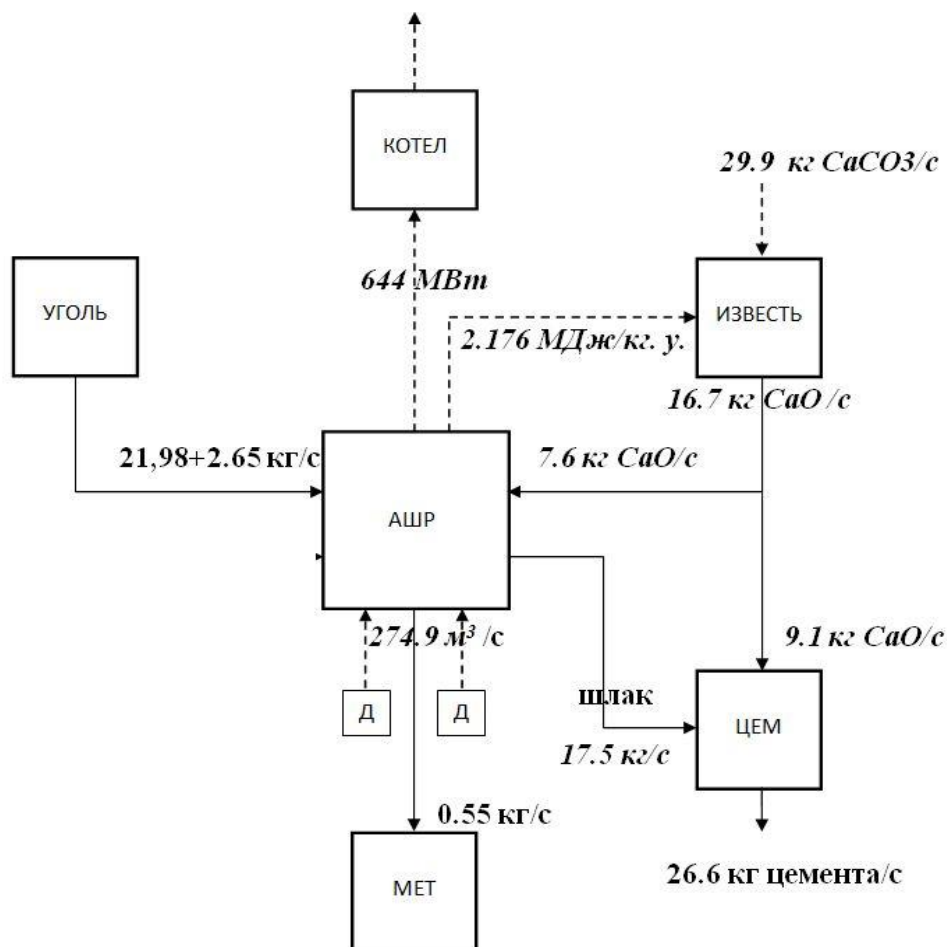


Рис. Схема чистой угольной ТЭЦ

Чистая угольная технология сжигания угля в шлаковом расплаве позволяет решать целый комплекс проблем, возникающих при сжигании угля традиционным способом. Образующийся шлак используется в полном объеме для производства цемента. Используются угли, которые при традиционной технологии сжигания угля из-за высокой зольности обычно не использовали на ТЭЦ.

Из рисунка видно, что аэрошлаковый расплав является сердцем ТЭЦ, которая в свою очередь становится комплексным предприятием, удовлетворяющим потребности разнообразных потребителей. Кроме электроэнергии, тепла и пара покрываются потребности в строительной продукции (производство цемента). Составленная схема наглядно позволяет оценить возможности чистых угольных технологий.

Таким образом, технология АШР открывает новые перспективы в решении проблем образования золошлакоотвалов, а также выбросов золы в атмосферу. При этом существует возможность получения строительных материалов, металла и тепловой энергии, необходимой городу.

#### Список литературы

1. Magnitog.ru: официальный сайт администрации города Магнитогорска [Электронный ресурс]. URL: <http://www.magnitog.ru>. (дата обращения: 23.09.2014).
2. Оценка условий безотходного сжигания энергетического угля / О. В. Быкова, Р. В. Захаров, Л. А. Закуцкая, С. В. Картавцев // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России : сборник статей по результатам Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и специалистов (Магнитогорск, 20-22 мая 2014 г.). Магнитогорск : МГТУ, 2014. С. 22–25.

УДК 620.9

Захарова Г. Б., Кривоногов А. И.  
Институт урбанистики ФГБОУ ВПО «УралГАХА»  
zgb555@gmail.com, kai5407@gmail.com

### **ЗЕЛЕННЫЕ СТАНДАРТЫ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ В РЕАЛИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ «ПРИКЛАДНАЯ ИНФОРМАТИКА В АРХИТЕКТУРЕ»**

В наше время все более популярным становится «зеленое строительство», технологии энергоэффективности, пассивные активные мультикомфортные дома, вопросы ресурсосбережения и экологии.

«Зеленое строительство» – это вид строительства и эксплуатации зданий, которые минимально воздействуют на окружающую среду. Целью такого строительства является снижение уровня потребления энергетических и материальных ресурсов на протяжении всего жизненного цикла здания: выбор участка, проектирование, строительство, эксплуатация, ремонт и снос. Другой целью «зеленого строительства» является сохранение или повышение качества зданий и комфорта их внутренней среды. Эта практика расширяет и дополняет класси-

ческое строительное проектирование понятиями экономии, полезности, долговечности и комфорта. Регламентировать устойчивый подход в строительстве, оценить степень соответствия зданий исходным принципам призваны «зеленые стандарты».

В странах, где развивается экологическое строительство, создаются национальные «зеленые стандарты», учитывающие социально-экономические и природные условия страны: законодательство, государственную политику в отношении энергоресурсов и экологии, климатические условия, степень осознания проблем энергоэффективности и экологичности профессиональными сообществами и населением.

Основными стандартами в мире являются американский LEED (предложен в 1998 году) и британский BREEAM (разработан в 1990 году), на которые приходится 80 % всех сертифицированных зданий.

К концу 2011 года в России построено несколько десятков зданий по стандартам LEED и BREEAM. Среди них торговая, жилая недвижимость, спортивные сооружения. Главным стимулом в России является наличие спроса, а в мире – этические причины и трансформация рынка. Стоимость такого строительства для вновь спроектированного здания на 7 % дороже и на 10–15 % выше при внедрении в существующий проект.

Концепцию пассивного дома предложили в 1988 году В. Файст [1], основатель «Института пассивного дома» в Дармштадте (Германия) [2], и профессор Б. Адамсон из Лундского университета (Швеция).

Пассивный дом, энергосберегающий дом или экодом – сооружение, основной особенностью которого является отсутствие необходимости отопления или малое энергопотребление, – в среднем около 10 % от удельной энергии на единицу объёма, потребляемой большинством современных зданий. В большинстве развитых стран существуют собственные требования к стандарту пассивного дома.

Первый пассивный дом был построен в 1990 г. в городе Дармштадт, там же в 1996 году был создан «Институт пассивного дома».

Далее была предложена концепция «активного дома», который помимо того, что тратит мало энергии, ещё и сам вырабатывает её столько, что может не только обеспечивать себя, но и отдавать в центральную сеть (дом с положительным энергобалансом).

Отмеченные тенденции в строительстве и проектировании находят отражение в уникальной междисциплинарной специальности «Прикладная информатика в области архитектуры». Образовательная программа реализована в Институте урбанистики УралГАХА.

В качестве самостоятельного направления в образовательной программе «Прикладная информатика в архитектуре» выступает самостоятельный курс «Информационные технологии в ресурсо- и энергосбережении».

Признанным инструментом оценки энергоэффективности в мире является «Пакет проектирования пассивного дома» (PHPP), который может непосредственно применяться архитекторами и проектировщиками. PHPP разработан в

Институте пассивного дома, г. Дармштадт, Германия. В России распространением пакета РНРР-2007 занимается Институт пассивного дома в Москве.

Студенты принимают участие в международном архитектурном студенческом конкурсе от международной группы Сен-Гобен (Франция) по проектированию мультикомфортных зданий и развитию территории. Объектами конкурса в последние годы были следующие.

- 2013 год. Развитие района *Gluckstein Quartier*, Маннхейм, Германия.
- 2014 год. Проектирование школы будущего, г. Газиантеп, Турция.
- 2015 год. Проект жилого квартала для холодного климата на площадке ЕХРО в Астане, Казахстан.

В 2013 году национальный полуфинал конкурса проходил в Институте урбанистики. В 2014 году совместно с кафедрой архитектуры УрФУ удалось создать межвузовскую команду УрФУ–УралГАХА.

Важную роль в образовательном процессе Института урбанистики играет ежегодная выездная урбанистическая школа. Темой урбанистической школы, состоявшейся в марте 2013 года, стали вопросы энергоэффективности в проектировании и строительстве, пассивные дома. К участию в этом научно-образовательном мероприятии были приглашены ведущие специалисты в данной области, будущие работодатели и другие заинтересованные организации. В частности, с интересными докладами выступили директор компании «Теплокрепость», г. Екатеринбург, О. В. Аношин (сайт компании <http://www.teplokrepost.ru>), специалист по соломенному домостроению на Урале архитектор С. В. Симкин, представитель компании KNAUF А. А. Филиппов, представитель компании «ЮИТ Уралстрой» С. Л. Андрейчиков и другие.

Большая роль отводится организации круглых столов и мастер-классов в рамках различных выставок, а также участие студентов в различных экскурсиях и конференциях. В 2011 году проводился круглый стол «Реконструкция зданий советского периода» с участием представителей ТСЖ «Родонитовая, 8» (Сутугина Н. Н), компании «ПромЭнергоПривод» (Абрамов М. В.), компания Кайдунь, солнечные водонагреватели г. Хайнин, Китай (Жень Жунь, генеральный директор). Позднее некоторые студенты и преподаватели кафедры «Прикладной информатики» побывали на экскурсии в доме на ул. Родонитовой, 8. На крыше этого многоэтажного дома впервые в России были установлены солнечные коллекторы для обеспечения жильцов здания горячей водой с ранней весны до поздней осени. К сожалению, этот эксперимент был загублен, а солнечные коллекторы демонтированы.

31 октября 2014 года студенты и преподаватели Института урбанистики приняли участие в экскурсии на первый в России активный дом класса А+ в ЖК «Экодолье» (г. Екатеринбург), а затем приняли участие в конференции архитекторов Волго-Уральского региона. Мероприятие проводила компания VELUX. Рассматривались такие темы, как первый активный дом в России: особенности архитектурного решения, принципиальные отличия от стандартной архитектуры, проектирование узлов энергоэффективного дома, мультикомфортный дом от идеи до реализации.



Вопросы экологии и энергоэффективности находят отражение в дипломных работах студентов. В качестве примера укажем некоторые темы дипломных работ по рассматриваемому направлению:

«Разработка проекта жилого микрорайона в г. Екатеринбурге в связи с требованиями энергосбережения (с применением САПР)», «Разработка презентационных технологий по теме «Интерактивный умный дом» для продвижения проекта частного эко-дома», «Использование зеленых стандартов при реконструкции частного жилого дома с применением САПР».

Таким образом, междисциплинарная образовательная программа «Прикладная информатика в архитектуре» отражает современные тенденции автоматизации процессов проектирования, особенно в сфере энергоэффективных зданий.

#### Список литературы

1. Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов. М. : АСВ, 2011. 144 с.
2. Институт пассивного дома, г. Дармштадт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.passiv.de/> (дата обращения: 18.11.2014).

УДК 697.7

Земсков П. Д., Краснова Н. П.  
Самарский государственный технический университет  
[ptvcrjd@yandex.ru](mailto:ptvcrjd@yandex.ru)

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ОТОПЛЕНИЯ

Энергосбережение в России является одним из приоритетных направлений науки и техники. В настоящее время существует тенденция перехода от централизованных источников энергоснабжения на автономные с целью снижения потребления энергоресурсов. Традиционным видом теплоносителя в системах децентрализованного отопления является вода. Основными достоинствами воды являются ее доступность, безвредность, невысокая стоимость и довольно высокая теплоемкость. Однако есть недостатки в виде растворенных в ней солей кальция и магния, которые вызывают отложение накипи на внутренних поверхностях трубопроводов, высокий удельный вес и замерзание при температуре 0 °С, что ограничивает ее использование в системах отопления периодического действия в зимний сезон [1].

Предлагается перейти от привычных систем водяного отопления к системам «незамерзающего» отопления с использованием специальных химических теплоносителей – антифризов, этиленгликоля, пропиленгликоля, глицерина и др. Такие теплоносители обладают рядом свойств, в значительной степени отличающих их от традиционных систем. Приведем сравнение характеристик нескольких теплоносителей.

*Антифриз* – это общее название для жидкостей, не замерзающих при отрицательных температурах [2]. В качестве базовых жидкостей антифризов используются смеси этиленгликоля, пропиленгликоля, глицерина, одноатомных спиртов и воды. В системах теплоснабжения может применяться и автомобильный антифриз, что часто практиковалось в России в связи с недостаточным наличием бытовых теплоносителей-антифризов. Использование автомобильных антифризов в системах отопления возможно, если они изготовлены по технологии, предполагающей использование жидкости для охлаждения двигателей внутреннего сгорания, а также в качестве рабочей жидкости в теплообменных аппаратах, эксплуатируемых при низких и умеренных температурах. Пакеты присадок обычных автомобильных антифризов не рассчитаны на длительную и интенсивную эксплуатацию в бытовых системах отопления. В некоторых случаях присадки, содержащиеся в современных автомобильных жидкостях и рассчитанные на сплавы автомобильного двигателя, могут не сочетаться с материалами систем домашнего отопления. Для снижения повышенной коррозионной активности антифриза используются ингибиторы коррозии. В современных системах отопления обычно применяются одновременно несколько видов металлов и сплавов (радиаторы из стали, алюминия или чугуна, стальные или медные трубы, теплообменники котлов из меди, стали или чугуна), между которыми, при наличии электропроводящей среды, возникает электрохимическая коррозия. В состав также вводят ингибиторы против образования накипи, набухания и растворения резиновых уплотнителей систем отопления, пеногасители.

Главным положительным свойством антифриза является отсутствие кристаллизации при застывании. Это означает, что систему отопления можно запустить тогда, когда это необходимо не боясь за ее разрушение.

*Этиленгликоль* как в составе антифриза, так и самостоятельно также может использоваться в системах отопления. Он обладает хорошими теплофизическими свойствами, низкими показателями отложения солей и накипи. Однако применение этиленгликоля особенно нежелательно в двухконтурных котлах, когда возможен подмес теплоносителя из контура отопления в контур горячего водоснабжения, а также в открытых системах отопления (с открытым расширительным баком), где возможно испарение теплоносителя. Антифризы на основе этиленгликоля нельзя перегревать – это ведет к термическому разложению этиленгликоля и антикоррозионных присадок. Образующиеся кислоты и осадки могут негативно влиять на работу всей отопительной системы. Это токсичное вещество, не имеет неприятного запаха и обладает сладковатым вкусом, что представляет повышенную опасность для детей и животных в случае протечек теплоносителя из системы.

Низкозамерзающий теплоноситель, изготовленный на основе *пропиленгликоля*, безопасен для человека и экологичен для окружающей среды. Является самым безопасным теплоносителем среди нестандартных. Он обладает хорошими теплофизическими свойствами, некоррозионноактивен, совмещается практически со всеми видами материалов систем отопления. При полном испарении воды из состава пропиленгликоль способен оставаться текучим до минус 60 °С. Его показатели в несколько раз превосходят этиленгликолевый теплоно-

ситель. Пропиленгликоль неопасен даже при длительном вдыхании паров, и не вызывает отравления при случайном приеме внутрь. Теплоноситель на основе пропиленгликоля обладает меньшей плотностью, по сравнению с этиленгликолевыми теплоносителями, и благодаря этому, необходимо меньше затрат на прокачку теплоносителя.

Существует еще один вид теплоносителя на основе *глицерина*. В системах отопления обычно используют пищевой глицерин. По безопасности применения в открытых системах отопления он не уступает теплоносителям на основе пропиленгликоля. Глицерин токсикологически и экологически безопасен. Его плюсом является инертность по отношению к оцинкованным частям системы отопления. Однако глицерин в качестве теплоносителя по плотности превышает плотность воды на 15 %, что влечет за собой дополнительную нагрузку на систему и большие расходы на его циркуляцию по системе (таблица).

Основные характеристики теплоносителей

Поз.	Свойство	Теплоноситель				
		Вода	Дистиллированная вода	Антифриз		
				Этиленгликоль	Пропиленгликоль	Глицерин
1.	Температура замерзания, °С	0	0	–70	–65	–50
2.	Коррозионная активность	+	+	– (кроме оцинк. деталей)	– (кроме оцинк. деталей)	–
3.	Безопасность	+	+	–	+	+
4.	Стоимость, руб./л	0,02	10	70–85	80–110	80
5.	Срок эксплуатации, лет	≤ 1	≤ 1	5–10	5–10	8

Воду применять экономически выгодно в системах отопления домов с постоянным проживанием в зимний период, однако, использование воды с периодичным запуском системы отопления влечет за собой ряд неудобств, что ставит под вопрос использование такого теплоносителя.

Этиленгликоль возможно применять только в закрытых системах в жилых помещениях с постоянным контролем. При протечке и малейшем попадании этиленгликоля на поверхности пола, стен, их необходимо сразу заменить.

Использование антифриза на основе глицерина нежелательно по причине его высокой вязкости, термической нестабильности и сильном вспенивании, что приводит к ухудшению отвода тепла. В отличие от пропилен- и этиленгликолей при длительном нагреве свыше 90 °С глицерин разлагается с выделением летучих и канцерогенных веществ. При полном испарении воды из него глицерин замерзает при плюс 17–20 °С.

Самым эффективным и безопасным является применение пропиленгликоля. Несмотря на высокую стоимость, его можно применять в любых системах отопления, в том числе при нерегулярном использовании отопления в зимний период. Даже при полном испарении воды из него, температура замерзания останется на минус 60 °С (у этиленгликоля минус 13 °С). Его расширение при

замерзании незначительно и составляет всего 0,1 % (у этиленгликоля – 1,5 %). Использование пропиленгликоля также оправдывается минимальными затратами на него при ремонте системы, низкими эксплуатационными расходами и т. д.

#### Список литературы

1. СП 60.13330.2012 Отопление, вентиляция и кондиционирование. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. Введ. 2013-10-01. М. : Госстрой, 2012. 28 с.
2. ГОСТ 159-52. Жидкость охлаждающая низкотемпературная. Введ. 1952-10-01. М. : Изд-во стандартов, 1952. 9 с.
3. Теплоносители для систем отопления [Электронный ресурс]. URL: <http://www.teplonositel.com>. (дата обращения: 09.11.2014).

УДК 662.925

Иванова А. А., Гильметдинова Ю. Р., Микула В. А., Вальцев Н. В.  
Уральский федеральный университет,  
tes.urfu@mail.ru

## ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА СЖАТОГО ВОЗДУХА

В настоящее время возрастает интерес к использованию твердых топлив в энергетике. Это связано, во-первых, со значительным сокращением запасов природного газа и нефти, во-вторых, с достаточно высокой ценой этих энерго-ресурсов. Перспективным направлением является ПГУ на твердом топливе. В схеме гибридной ПГУ на основе процессов термообработки угля и «внешнего» сжигания топлива одним из ключевых элементов является высокотемпературный воздушнонагреватель, в нем нагревается сжатый воздух, направляемый затем в камеру сгорания газовой турбины.

В качестве основного конструктивного элемента рекуперативного устройства нагрева воздуха (воздушнонагревателя) чаще всего используется трубный металлический элемент. Для описания интенсивности теплообмена по воздуху в таком элементе при турбулентном режиме течения существует много критериевых зависимостей, наиболее распространенные из них приведены ниже:

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,021 Re_{дж}^{0,80} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж} / Pr_{с})^{0,25}, \quad (1)$$

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,023 Pr_{ж}^{0,4} Re_{дж}^{0,8}. \quad (2)$$

Разница между ними составляет ~10 %.

Очевидно, что для данных зависимостей наибольшее влияние на теплообмен оказывает плотность жидкости пропорционально  $\rho^{0,8}$  (определяется  $T$  и  $p$ ) и ее скорость пропорционально  $w^{0,8}$ . Менее заметно теплоотдача зависит от  $\lambda^{0,57}$ ,  $c_p^{0,43}$ ,  $\mu^{-0,37}$ . Влияние геометрического размера канала на теплоотдачу также оказывается относительно слабым  $\alpha \sim d_{эк}^{-0,2}$ . Опираясь на (1), получим  $\alpha \sim p^{0,8}$  и  $\alpha \sim T^{-0,53}$ .

Для воздухонагревателя гибридной ПГУ основные параметры, влияющие на теплообмен, изменяются в следующих пределах: скорость потока – 10–25 м/с (согласно рекомендациям по проектированию воздухонагревателей), температура воздуха – 400–1000 °С, давление воздуха – 1,5–3 МПа, диаметр трубопровода – 30–150 мм. Расчет по зависимостям (1) и (2) показал, что коэффициент теплоотдачи с изменением параметров теплообмена меняется в значительных пределах от 150 до 800 Вт/(м<sup>2</sup>·К), причем диапазон расширяется с ростом давления. При проектировании промышленных установок с факельным обогревом компромисс между  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  может быть достигнут путем подбора режимных параметров факела ( $\alpha_1$ ) и интенсификации внутреннего теплообмена ( $\alpha_2$ ).

Рекуперативный нагрев воздуха до высоких температур может быть произведен различными способами, из которых наиболее применимый в технике – факельный (либо нагрев высокотемпературными продуктами сгорания). В качестве альтернативной технологии можно привести разрабатываемые за рубежом приемники солнечной энергии, позволяющие использовать ее в различных установках, в том числе работающих по циклу Брайтона, где внутри ресивера протекает сжатый воздух, направляемый после подогрева до 800–1000 °С (в перспективе до 1500 °С) в камеру сгорания газовой турбины.

Рассмотрим нагрев воздуха от факела в топке энергетического котла. Интервал изменения температуры продуктов сгорания здесь лежит в пределах 1000–1900 °С, что соответствует  $\alpha_1$  в 120–300 Вт/(м<sup>2</sup>·К). В зависимости от давления воздуха (с известным набором параметров воздуха и геометрических параметров) существует граничное значение давления  $p_{гр}$ , условно разделяющее поле на две области:

- область преобладания внешнего теплообмена над внутренним ( $\alpha_2 < \alpha_1$ ) при  $p < p_{гр}$ ;
- область преобладания внутреннего теплообмена над внешним ( $\alpha_2 > \alpha_1$ ) при  $p > p_{гр}$ .

Основным ограничением при разработке устройств высокотемпературного нагрева воздуха является допустимая температура стенки рекуператора, который может быть изготовлен как из металла, так и из керамики. Металлические конструкции более устойчивы к динамическим нагрузкам и позволяют обеспечить лучшую газоплотность, в силу чего представляются предпочтительными. Наибольшей жаропрочностью обладают стали, легированные хромом, при содержании его 25–30 %. Максимальная температура для жаропрочных сталей достигает 1100–1200 °С. В газовых турбинах предельным уровнем температур металла рабочих лопаток, выполненных из жаропрочных сталей, считается 850–900 °С, однако они испытывают большие динамические нагрузки, в отличие от трубных элементов воздухонагревателя. С учетом запаса была принята максимальная рабочая температура металла – не более 1000 °С.

Для решения задачи интенсификации внутреннего теплообмена используется огромное количество конструкций, из которых применительно к задаче нагрева низконапорного воздуха до высоких (~ 800–1000 °С) температур был выбран способ с использованием стержневых вставок. В результате их применения увеличивается внутренняя поверхность теплообмена, нагрев которой

идет за счет переизлучения от внутренней поверхности трубы на вставку. Эффективность способа повышается с ростом температуры греющей среды.

Проведенные расчеты показали, что использование вставки «крест» при давлениях воздуха 1,5–3 МПа увеличивать тепловой поток в 1,5–1,7 раза.

При разработке устройств высокотемпературного нагрева компримированного воздуха вопрос поддержания температуры стенки рекуператора в допустимых пределах стоит менее остро благодаря большим внутренним коэффициентам теплоотдачи.

В то же время задача повышения компактности агрегата требует интенсификации внешнего теплообмена до значений, соответствующих теплообмену внутри трубных нагревательных элементов.

Для интенсификации внешнего теплообмена существует несколько основных способов:

1. Повышение температуры факела за счет:

- применения обогащенного кислородом дутья;
- повышения сверх стандартной температуры подогрева низконапорного воздуха, подаваемого для сжигания угольной пыли в топку;

2. Повышение давления греющей среды.

3. Увеличение наружной поверхности за счет оребрения.

Задача высокотемпературного нагрева компримированного воздуха решалась при разработке агрегата высокотемпературного нагрева воздуха для работы в схеме гибридной угольной ПГУ. Двухступенчатая подготовка рабочего тела для газовой турбины (нагретого воздуха) позволяет объединить в одной установке схемы ПГУ с внутрицикловой газификацией и «внешним» сжиганием, заметно уменьшая присущие им в отдельности недостатки, что повышает энергетическую эффективность в целом.

В рассматриваемой схеме в качестве устройства высокотемпературного нагрева воздуха использован котел с типичной пылеугольной топкой, лишь с тем отличием, что в ее поверхности нагрева подается цикловый воздух под давлением, который после нагрева до 800–1000 °С направляется в камеру сгорания газовой турбины и догревается там до рабочей температуры за счет сжигания синтез-газа.

С учетом особенностей разрабатываемого агрегата интенсифицировать внешний теплообмен 2-м и 3-м способами достаточно сложно. Повышение давления продуктов сгорания целесообразно, если они после котла не выбрасываются в атмосферу, а поступают на вход газовой турбины, что оказалось малоэкономичным, в том числе в связи с проблемами очистки газов. Развитие внешней поверхности с помощью различных ребер также затруднено из-за возможности заноса и шлакования поверхностей. Остается повышение температуры факела.

При увеличении температуры факела до предельных значений ~ 1900 °С разница между температурами факела и стенки – 900 °С, а разница между температурами стенки и воздуха – 200–600 °С (при температуре воздуха 800–400 °С). В результате, для обеспечения допустимой температуры металлической стенки трубы соотношение  $\alpha_1/\alpha_2$  должно быть 1,5–4,5, а  $\alpha_2$  должно быть

порядка 600–1500 Вт/(м<sup>2</sup>·К), т. е. необходимо использовать переизлучающие вставки, что требует дальнейшей проработки.

УДК 621.438

Исянгильдина Л. Х., Демин Ю. К., Картавец С. В.  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
dyomin.ura@yandex.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ОТ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОВЫХ ТУРБИН ПЕРЕД ОБЖИГОВЫМИ ПЕЧАМИ

В настоящее время мы сталкиваемся с проблемой повышения цен на энергетические ресурсы, что приводит к увеличению их доли в себестоимости конечного продукта. Таким образом, возникает задача наиболее эффективно и полно использовать потенциал сжигаемых топлив.

Обжиговые печи в промышленности являются незаменимыми помощниками при термообработке металла. Обжиг производится продуктами сгорания топлив (природный газ), при этом температура, необходимая для термообработки, часто бывает значительно ниже температуры горения топлива. Для охлаждения продуктов сгорания их разбавляют холодным воздухом. Однако при разбавлении продуктов сгорания происходит рост потерь теплоты с уходящими газами и потеря изначального температурного потенциала.

Данную проблему можно решить охлаждая дымовые газы путем их расширения в газовой турбине (ГТ) с выработкой электрической энергии. Произведенную энергию предприятие может потратить на собственные нужды. Также сокращаются объемы дымовых газов, а следовательно, и потери с дымовыми газами при выходе из печи.

Принципиальная схема с применением газовой турбины (рис. 1).

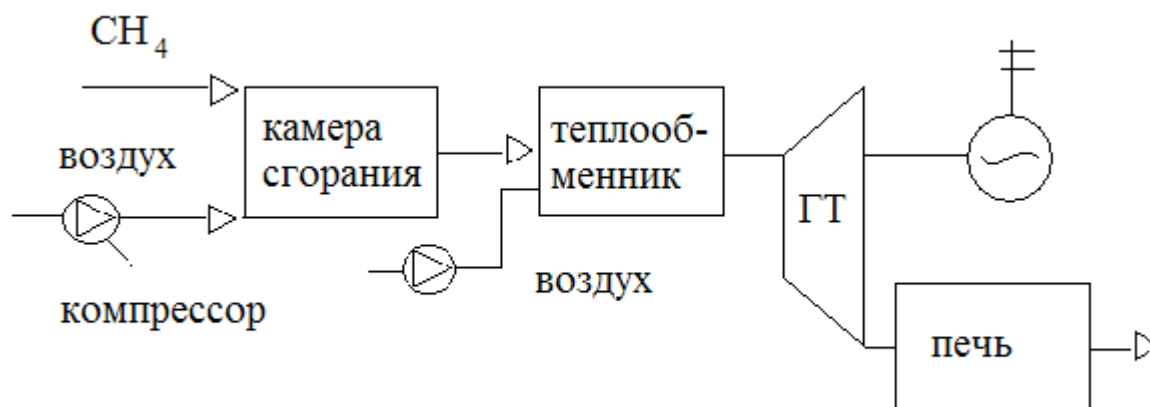


Рис. 1. Принципиальная схема с применением газовой турбины

Для оценки эффекта от применения ГТУ в данной работе рассчитана экономия топлива, получаемая за счет сокращения потерь с уходящими газами из печи, а также собственная генерация электрической энергии по сравнению с выработкой такой же электрической мощности на удаленной электростанции, с учетом затрат на собственные нужды (сжатие рабочего тела).

В расчетах было принято: сжатие в компрессоре – изотермическое, расширение в газовой турбине – адиабатное, сжигаемое топливо – метан, температура горения которого при коэффициенте избытка воздуха равна единице (около 1900 °С), потребителю (обжиговая печь) необходим тепловой поток мощностью 100 МВт, температура газов перед потребителем изменяется в интервале 500÷700 °С, температура дымовых газов на выходе 300 °С. Давление дымовых газов перед потребителем 0,6 МПа, перед газовой турбиной 3 МПа [1]. Температура дымовых газов на выходе из ГТУ равна их температуре на входе у потребителя, КПД удаленной электростанции 40 %, потери в линиях электропередач от электростанции до потребителя 9 %. Температура окружающей среды 20 °С.

Результаты расчетов, в виде экономии топлива, в % от количества, сжигаемого для потребителя без использования ГТУ, представлены в таблице.

Эффективность применения ГТ

Температура у потребителя, °С	500	550	600	650	700
Схема с ГТ					
Температура дымовых газов перед ГТ, °С	923	1001	1078	1156	1233
Мощность ГТ, МВт	90,72	88,55	86,73	85,18	83,84
Мощность компрессора, кВт	106,94	84	68,76	57,92	49,83
Расход условного топлива, кг/с	10,37	7,57	5,75	4,46	3,51
Схема без ГТ					
Мощность компрессора, МВт	58,89	46,45	38,18	32,31	27,92
Расход условного топлива, кг/с	9,01	7,54	6,56	5,87	5,35

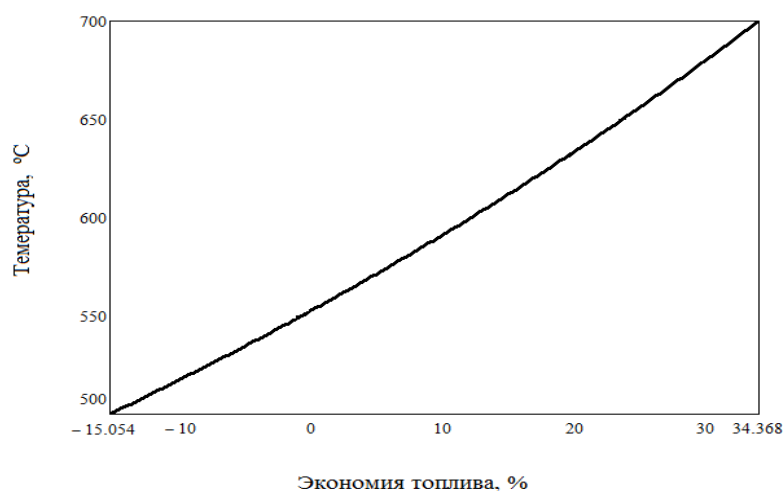


Рис. 2. Зависимость экономии топлива от температуры дымовых газов на входе у потребителя

На рис. 2 отображена зависимость экономии топлива.

Из рис. 2 видно, что экономия может составить 34,4 % от количества топлива сжигаемого для потребителя без использования ГТ.

Таким образом, охлаждение дымовых газов перед печами



за счет применения газовых турбин с генерацией электрической энергии может открыть возможности для значительной экономии топлива по сравнению с раздельной генерацией электрической энергии на удаленной электростанции и охлаждением дымовых газов за счет разбавления их холодным воздухом.

#### Список литературы

1. Тепловые и атомные электростанции : справочник / М. С. Алхутов, А. Н. Безгрешнов, Р. Г. Богоявленский [и др.]. М. : Издательский дом МЭИ, 2007. 648 с.

УДК 62-831

Казакбаев В. М., Боровских М. О., Нечаев А. В., Прахт В. А.  
Уральский федеральный университет,  
emf2010@mail.ru

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСА

Трехфазный частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) составляет значительную часть применяемого в промышленности и коммунальном хозяйстве электропривода. Помимо достижения высоких показателей обслуживаемого технологического процесса, применение ЧРП позволяет также получить значительный эффект энергосбережения. Современные требования к энергоэффективности таких установок регламентируются стандартами Международной энергетической комиссии (ИЕС).

В варианте системы ЧРП, повсеместно реализуемом в настоящее время в РФ, используются асинхронный электродвигатель (АД) класса энергоэффективности IE1 (EFF2) (классы энергоэффективности, согласно ГОСТ Р 54413-2011) и преобразователь частоты (ПЧ), адаптированный для управления АД. Регулирование скорости ЧРП обычно осуществляется по скалярному закону  $U/f = \text{const}$ . Такой способ регулирования прост и дешев в реализации, обеспечивает достаточный запас перегрузочной способности, не предъявляет повышенных требований к производительности микропроцессора ПЧ и не требует применения датчиков обратной связи в составе привода. Однако энергоэффективность такой конфигурации достаточно сильно падает при необходимости длительной работы привода на скорости ниже номинальной.

На рис. 1,а приведено теоретическое сравнение (по схеме замещения) величины КПД для АД 0,55 кВт, 1500 об/мин при частотном регулировании, для случая работы на насосную нагрузку. Рассмотрены случай регулирования по закону  $U/f = \text{const}$  (сплошная линия) и случай регулирования по закону  $U/f^2 = \text{const}$  (штриховая линия), который при данной нагрузке оказывается оптимальнее. Второй случай на практике соответствует более сложным векторным системам регулирования, с использованием датчиков обратной связи. Видно,

что величина увеличения КПД для второго случая (штриховая линия), в сравнении с первым случаем (сплошная линия), возрастает по мере увеличения глубины регулирования (уменьшения скорости). При скорости двигателя 40 % от номинальной разница в КПД между двумя рассматриваемыми случаями составляет уже более 15 %. Существуют и другие решения, которые могут значительно увеличить энергоэффективность насосной установки с ЧРП. Например, применение синхронных двигателей (СД) вместо АД: в этом случае значительно повышается КПД привода в номинальном режиме, а при регулировании скорости КПД будет уменьшаться в меньшей степени (рис. 1,а, штрихпунктирная линия).

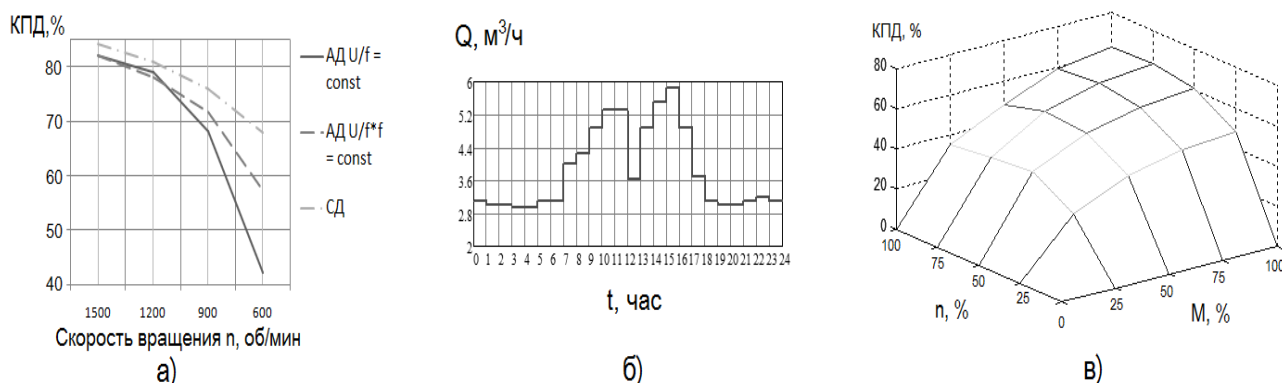


Рис. 1. Теоретическое сравнение (по схеме замещения) величины КПД:  
а) КПД насосной установки при различных способах регулирования,  
б) график дневной загрузки насосной установки,  
в) экспериментальная характеристика КПД ( $M, n$ ) для АИР 71А4

В отечественной практике при расчете энергопотребления ЧРП описанное явление уменьшения КПД обычно не учитывается [1]. Одной из основных причин этого является недостаточность паспортных данных двигателя для номинального режима, приводимых в соответствие с ГОСТом, для достаточно точной оценки КПД двигателя в режимах при пониженной скорости и частичной нагрузке.

Предметом данной работы является оценка влияния на величину энергопотребления ЧРП вышеописанного явления, снижения КПД привода при увеличении глубины регулирования. С этой целью рассматривается случай работы насосной установки *Calpeda* NM4 25/200BE (0,55 кВт, 1450 об./мин), которая используется для перекачки технологической жидкости, с плотностью  $\rho = 1000\text{ кг/м}^3$ . Загрузка насоса по требуемому расходу воды при пиковом потреблении близка к номинальной и имеет в течение дня распределение, типичное для насоса промышленного предприятия (рис. 1, б). Характеристики насоса по напору  $H$  и КПД, в зависимости от расхода  $Q$  при работе на номинальной скорости, взяты из сообщаемых производителем данных [2]. Для привода насоса должен использоваться электродвигатель 0,55 кВт, 1500 об/мин. В качестве такого двигателя в данной работе рассматривается АИР 71А4 российской фирмы «Eneral». Необходимые для расчетов значения КПД двигателя в различных режимах при питании от ПЧ были экспериментально измерены, в ходе ряда

нагрузочных опытов. В качестве источника питания двигателя использовался преобразователь частоты ABB ACS150-03E-04A1-4. Потребляемая из сети приводом насосной установки электрическая мощность рассчитывается по формуле [1]:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_{\Sigma}} = \frac{r \cdot g \cdot H \cdot Q}{\eta_{\text{pump}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{FC}}}, \quad (1)$$

где  $P_2$  – полезная мощность, создаваемая установкой;  $r = 1000 \text{ кг/м}^3$  – плотность перекачиваемой технологической жидкости,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $Q$  – расход жидкости, обеспечиваемый насосом в данном режиме;  $H$  – напор, обеспечиваемый насосом данным режиме;  $\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{pump}} \cdot \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{FC}}$  – результирующий КПД установки. Здесь  $\eta_{\text{pump}}$  – КПД насоса,  $\eta_{\text{motor}}$  – КПД двигателя,  $\eta_{\text{FC}}$  – КПД преобразователя частоты.

КПД и напор насоса при номинальной скорости и текущем расходе определяются из паспортных данных насоса. Для пересчета характеристик работы насоса на другое значение расхода используются формулы подобия [1]. Изменение КПД насоса  $\eta_{\text{pump}}$  при изменении скорости вращения не учитывается. Величина КПД преобразователя частоты также была принята постоянной и равной экспериментальному значению, измеренному в номинальном режиме:  $\eta_{\text{FC}} = 0,95$ . Суточное энергопотребление установки рассчитывается по формуле:

$$\Delta W_{\text{day}} = \sum_i^k P_i \cdot t_i, \quad (2)$$

где  $\Delta W_{\text{day}}$  – суточная экономия электроэнергии в результате применения предлагаемого решения;  $P_i$  – экономия мощности, соответствующего  $i$ -му интервалу времени, в течение которого насос работал с постоянной нагрузкой, кВт;  $t_i$  – продолжительность  $i$ -го интервала времени, ч;  $k = 24$  – число рассматриваемых интервалов времени на общем временном интервале.

Для оценки величины дополнительных потерь энергии в электродвигателе при регулировании сравним результаты расчета величины энергопотребления, принимая в первом случае величину КПД электродвигателя в формуле (1) неизменной и равной экспериментальному значению КПД двигателя в номинальном режиме  $\eta_{\text{motor}} = \eta_{\text{ном}} = 0,63$ . Во втором случае величина КПД двигателя рассчитывается, согласно экспериментальной зависимости (рис. 1, в). Рассчитанное по формуле (2) дневное энергопотребление привода в первом случае составляет  $W_1 = 4,925 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . При учете реального изменения КПД двигателя в режимах с регулированием скорости (рис. 1, в) эта величина составляет уже  $W_2 = 6,645 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . Таким образом, в первом случае не учитывается 26 % всей реально потребляемой мощности. Это приводит к недооценке годовой стоимости электроэнергии, потребляемой приводом, на 1380 руб. (стоимость кВт·ч принята 2,2 руб. [3]) при стоимости электродвигателя АИР 71А4, равной 1800 руб.

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

– в работе на основе экспериментальных данных рассмотрен эффект изменения эффективности ЧРП при изменении глубины регулирования скорости. Показано, что неучет рассматриваемого фактора приводит к значительному недоучету действительного энергопотребления электропривода, что может быть причиной недооценки экономического эффекта внедрения ЧРП более высоких классов энергоэффективности и реализации других мер по увеличению КПД привода;

– мерой, которая значительно упростит корректный учет энергопотребления, является дальнейшее развитие стандартизации систем ЧРП. К имеющимся данным, доступным покупателю частотно-регулируемых двигателей и комплектно поставляемого ЧРП (ПЧ+двигатель), необходимо добавить информацию о КПД двигателя при частичной нагрузке и частичной скорости. Такой информацией, в соответствии со стандартом EN 50598-2, уже начинают снабжать поставляемые ЧРП ведущие европейские производители.

#### *Список литературы*

1. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М. : Энергоатомиздат, 2006.
2. NM4, NMS4, Close Coupled Centrifugal Pumps: catalogue. Calpeda, 2012.
3. Электроэнергетика : тенденции и прогнозы : аналитический бюллетень. М. : РИА Новости, 2014. Вып. 14.

УДК 621.486

Калмыкова Н. С., Мурашова В. Н., Демин Ю. К., Картавец С. В.  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова  
dyomin.ura@yandex.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ORC В МНЛЗ**

За первые 8 месяцев 2014 года выплавка стали в мире составила 1,096 млрд т, что на 2,4 % больше, чем за аналогичный период 2013 г. [1]. Около 90 % всей производимой в мире стали разливается на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). При этом затраты электроэнергии на собственные нужды МНЛЗ составляют 1,87 кВт·ч на каждую тонну разливаемой стали [2].

Следует отметить, что при разливке стали в МНЛЗ отводится порядка 840 МДж/т тепловой энергии [3]. Вся эта теплота передается охлаждающей воде, в результате чего может быть получен низкопотенциальный пар с температурой около 100 °С.

Таким образом, возникает задача по поиску решения для использования, отводимого в МНЛЗ теплового потока.

При выборе направления использования отведенной теплоты необходимо в первую очередь учитывать собственные нужды МНЛЗ, состоящие в основном

из затрат электроэнергии на привод механического оборудования и насосов для циркуляции охлаждающего теплоносителя.

Для генерации электрической энергии на тепловыделения МНЛЗ авторами предлагается применение органического цикла Ренкина (ORC) на низкокипящих рабочих телах. В данной схеме водяной пар из МНЛЗ поступает в теплообменник-испаритель, где за счет его теплоты нагревается низкокипящее рабочее тело (НРТ). Перегретый пар НРТ поступает в турбину, а затем в воздушный конденсатор, где конденсирует при температуре окружающей среды. Конденсат НРТ через насос поступает в теплообменник при заданном давлении, где снова нагревается за счет теплоты водяного пара от МНЛЗ (рис. 1).

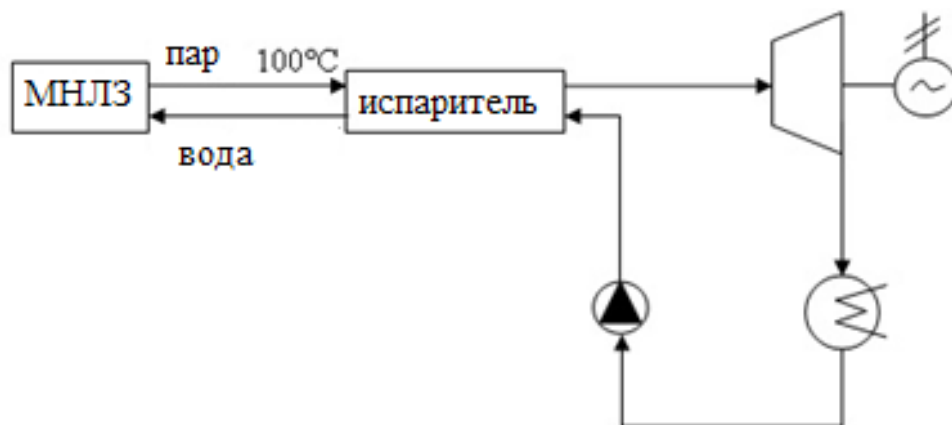


Рис. 1. Схема МНЛЗ с ОРЦ

Для оценки энергосберегающего эффекта от применения разработанной схемы был произведен расчет количества отпускаемой потребителю электрической энергии. В качестве НРТ был выбран R143a. Результаты расчетов представлены в таблице.

Расчет количества отпускаемой потребителю электрической энергии

Параметр	Значение
Температура окружающей среды, °С	20
Тепловыделение в МНЛЗ, МДж/т стали	840
Температура сухого насыщенного водяного пара на выходе из МНЛЗ/входе в испаритель, °С	100
Температура перегретого пара НРТ, °С	90
Давление перегретого пара НРТ, МПа	2,76
Температура пара НРТ в воздушном конденсаторе, °С	30
Давление паров НРТ в воздушном конденсаторе, МПа	1,44
Расход НРТ, т/т стали	3,6
Количество генерируемой электрической энергии, кВт·ч/т стали	72,4
КПД ОРЦ, %	31

Из таблицы видно, что применение разработанной схемы позволяет покрыть не только собственные нужды, но и дополнительно произвести более 70 кВт·ч с каждой тонны разливаемой стали.

Рассмотренный выше ОРЦ изображен на рис. 2.

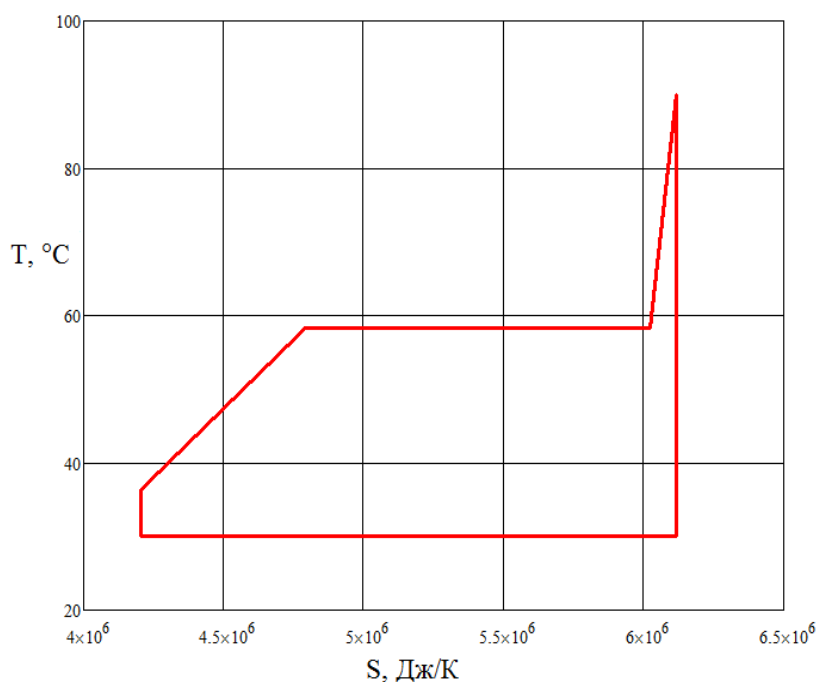


Рис. 2. T-S диаграмма ORC

Таким образом, реализация рассмотренной выше схемы с использованием отводимой от МНЛЗ теплоты в ORC, открывает возможность для собственной генерации электрической энергии в сталеплавильном комплексе. Учитывая растущие тарифы на электроэнергию, а также все более широкое применение дуговых сталеплавильных печей на металлургических предприятиях, это является важной задачей и позволит сократить себестоимость производимой продукции.

#### Список литературы

1. Monthly crude steel production archive: материалы официального сайта компании World Steel Association [Электронный ресурс]. URL: <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/monthly-steel-archive.html> (дата обращения: 12.11.2014).
2. Строгонов К. В., Картавец С. В. Жидкая сталь: использование теплоты и скоростная разливка. Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2006. С. 147.
3. Использование тепловых потерь в электросталеплавильном комплексе для выработки электроэнергии / С. В. Матвеев, Р. В. Захаров, Х. Н. Аловадинова, Е. Г. Нешпоренко, С. В. Картавец // Электротехнические системы и комплексы: международный сборник научных трудов. Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2013. С. 298–301.

УДК 621.311.22

Каргина К. А., Картавец С. В.  
Московский институт стали и сплавов, Новотроицкий филиал,  
МГТУ им. Г. И. Носова (г. Магнитогорск)

### ОЦЕНКА РЕЗЕРВОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЭЦ ОАО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ» Г. НОВОТРОИЦКА

Температура окружающей среды оказывает большое влияние на эффективность работы энергетических систем и станций. Так, например, в летнее время температура может достигать +30 °С и более. В системах водяного охлаждения с градирнями это приводит к повышению температуры охлаждающей

воды практически до температуры окружающей среды. Охлаждающая вода с такими параметрами приводит к ухудшению вакуума в конденсаторах тепловых электрических станций, что, в свою очередь, приводит к снижению коэффициента полезного действия станции. В этих условиях необходимо разработка методов снижения температуры охлаждающей воды после градирен [1].

С другой стороны, в летнее время на промышленных предприятиях и на ТЭС появляется избыток пара. Зачастую этот избыток пара сбрасывается в окружающую среду.

Новейшей тенденцией современной теплоэнергетики является тригенерация – система, состоящая из когенерационной установки и пароэжекторной холодильной машины, которая позволяет повысить эффективность работы и обеспечить высокий КПД в течение всего календарного года.

Тригенерация – процесс выработки трёх видов энергий одновременно: это электричество, тепло (горячая вода) и холод (холодная вода).

Охлаждение воды в тригенераторной установке происходит за счет процесса абсорбции горячего пара. Кроме того, при подключении компрессорных холодильных установок к тригенераторной установке можно получить не только охлажденную воду, но и воду с температурой ниже 0 градусов. Выгода от использования тригенераторной установки по сравнению с когенераторной очевидна, поскольку её использование позволяет эффективно распределять излишки тепла, получаемые при работе турбины [2].

Использование процесса тригенерации более эффективно в летний период, так как излишки тепла от работы турбины можно направить на получение охлажденной воды, а её, в свою очередь, пустить на технологические нужды. В зимнее время года, когда пропадает потребность в холодной воде, пароэжекторная установка может быть отключена. В этом случае всё вырабатываемое турбиной тепло используется в системе отопления.

*Общие сведения о структурном подразделении.* ТЭЦ-ПВС предназначена для снабжения электроэнергией, теплом (в виде пара и горячей воды), доменным дутьем, химически очищенной водой цехов комбината и для отопления города. ТЭЦ-ПВС с установленной электрической мощностью 172 МВт введена в строй 20.10.1950 г.

*Описание технологического процесса и основных технологических участков.* ТЭЦ – теплоэлектроцентраль, электрическая станция с комбинированной выработкой электрической и тепловой энергии.

На ТЭЦ используется 4 вида топлива:

- природный газ;
- коксовый газ;
- доменный газ;
- каменный уголь.

1) *Топливоподача.* Уголь с открытого склада вагонами доставляется в разгрузочный сарай, где вагоны разгружаются в щелевые бункера. Далее уголь двумя параллельно работающими 1-м и 2-м конвейерами подается на молотковые дробилки. После дробления размельченное топливо ленточными конвейерами 3, 4, 5 (по 2 нитки) подается в бункера сырого угля котлов 3, 4, 5, 6, 7. От-

туда питателями сырого угля (ПСУ) оно подается в шаровые барабанные мельницы (по 2 на котел). Угольная пыль, получаемая в мельницах, мельничными вентиляторами транспортируется в бункера пыли, откуда питателями пыли (по 6 на котел) подается в котел. Для поддержания горения в топку дутьевыми вентиляторами (по 2 на котел) нагнетается воздух.

Продукты сгорания выбрасываются через дымовые трубы в атмосферу дымососами (по 2 на котел).

Пульпа – зола, смываемая водой в скрубберах, при помощи системы золоудаления багерными насосами транспортируется в золонакопители. Система гидрозолоудаления замкнутая, поэтому вода осветляется (отстаивается) и снова подается в котельный цех.

2) *Хим. водоочистка (ХВО)*. Поскольку использование обычной воды в котлах неприемлемо из-за образования накипи на трубах котлов, на ТЭЦ существует цех ХВО- I, III. Очистка воды заключается в уменьшении ее жесткости, то есть уменьшении концентрации солей Са и Mg и понижении щелочности.

3) *Котельный цех*. Химически очищенная вода предварительно нагревается подогревателями высокого давления. Затем питательными насосами она подается в котлы. В котле вырабатывается пар, который поступает в коллекторы пара, от которых происходит его распределение по турбинам.

4) *Турбинный цех*. Турбина и генератор сидят на одном валу. Пар, вращая турбину, вращает и ротор генератора. Генератор вырабатывает электроэнергию. В турбинах существуют промежуточные отборы пара.

Пар после турбины попадает в конденсаторы, где охлаждается и конденсатными насосами снова поступает в подогреватели высокого давления. Цикл повторяется. Потери воды восполняет ХВО.

Вода, используемая для охлаждения отработанного пара, подается циркуляционными насосами в конденсатор. Нагреваясь в конденсаторах, циркуляционная вода поступает в градирни и брызгальный бассейн, где охлаждается, а потом самотеком поступает к циркуляционным насосам. Потери ее восполняются из реки Урал [3].

В летний период градирни охлаждают воду на 2–4 °С, что неэффективно. Увеличивается давление пара в конденсаторе. Давление пара в конденсаторе всегда следует снижать до минимальной возможной величины, которая определяется температурой воды, охлаждающей конденсатор, зависящей, в свою очередь, от условий окружающей среды и системы водоснабжения.

В связи с этим есть смысл между градирней и конденсатором установить парозежекторную холодильную установку, которая будет доохлаждать воду с градирен, т. е. вода в конденсатор будет поступать с температурой на несколько градусов ниже обычного. Тем самым улучшается вакуум в конденсаторе, что приводит к экономии электроэнергии и топливных ресурсов.

*Расчет экономичности.* Средняя температура за летний период составляет 20,3 °С. Минимальная температура воды +5 °С.

При снижении температуры воды, подаваемой на конденсатор, на 1 °С будет достигнуто уменьшение потребления на 1,2–2 г условного топлива на выработку 1 кВт·ч:



$$\Xi = T_{\text{воздуха в лет период}} - (+5) \cdot 1,5 = 20,3 - (+5) \cdot 1,5 = 12,8 \text{ г.}$$

Общая экономичность составит  $172 \cdot 12,8 \cdot 86400 \cdot 30 = 5706,5472 \text{ т у. т. за летний период.}$

$$5706,5472 \cdot 2000 = 11413094,4 \text{ руб. за один месяц летнего периода.}$$

$$11413094,4 \cdot 3 = 34239283,2 \text{ руб. за летний период.}$$

*Выводы.* Совершенствование теплоэнергетики не стоит на месте. Применение паровожеторной установки – прямое этому доказательство. Высокий коэффициент полезного действия, экономия электрической энергии, топлива, а следовательно, и материальных средств – вот только некоторые плюсы использования этой машины.

#### Список литературы

1. Понаморенко В. С., Арефьев И. Ю. Градирни промышленных и энергетических предприятий. М. : Энергоатомиздат, 1998. 188 с.
2. Григорьева В. А., Зорин В. М. Теплоэнергетика и теплотехника. М. : Энергоатомиздат, 1991. 587 с.
3. Елизаров Д. П. Тепловые электрические станции. М. : Издательский дом МЭИ, 2009. 466 с.

УДК 621.577.4

Карпиков С. Н., Шемпелев А. Г.  
Вятский государственный университет, г. Киров  
ksnne@mail.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК В СИСТЕМАХ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЭС

Тепловые электростанции обладают большим количеством низкопотенциальной теплоты, к ней относится: теплота охлаждающей оборотной воды, продувочной воды паровых котлов, сбросы отработанных теплоносителей из различных видов оборудования.

В настоящей работе рассматривается модернизированная схема оборотного водоснабжения ТЭЦ с использованием ТНУ, которая позволит отбирать теплоту от нагретой в конденсаторе турбины охлаждающей воды, повышать потенциал этой теплоты в ТНУ и полезно использовать ее для повышения выработки электрической энергии. Использование такой схемы позволит возвращать в цикл станции часть теплоты, которая ранее терялась в окружающую среду, а также увеличить выработку электрической энергии за счет понижения давления в конденсаторе. С этой целью предлагается включить конденсатор ТНУ в воздухопровод дутьевого вентилятора для предварительного подогрева воздуха перед воздухоподогревателями до установленной температуры. Такая схема позволяет отказаться от неэкономичного предварительного подогрева воздуха в калориферах, греющим агентом в которых, как правило, является пар производственного отбора с высокими параметрами (рис. 1).

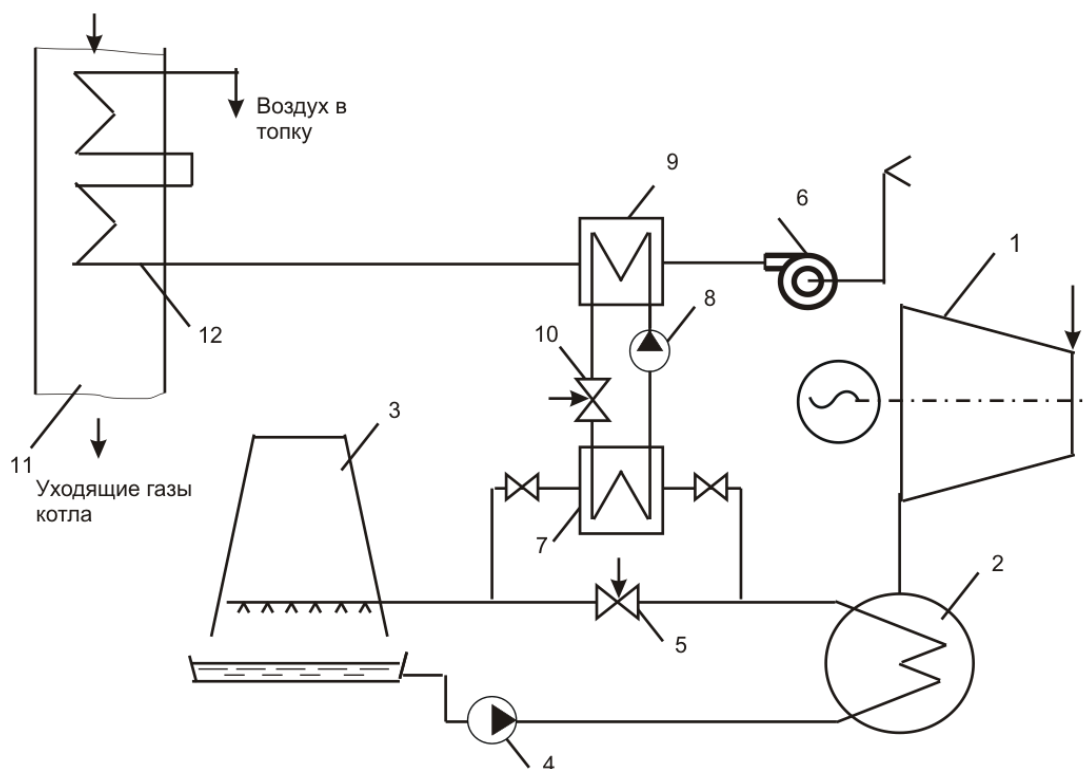


Рис. 1. Схема ТЭЦ с ТНУ для подогрева воздуха перед котлом:

1 – паровая турбина; 2 – конденсатор паровой турбины; 3 – градирня; 4 – циркуляционный насос; 5 – регулятор; 6 – дутьевой вентилятор; 7 – испаритель теплового насоса; 8 – компрессор теплового насоса; 9 – конденсатор теплового насоса – подогреватель воздуха; 10 – дроссель; 11 – газоход котла; 12 – подогреватель воздуха котла

Проведенные расчеты для турбины ПТ-80 при работе в конденсационном режиме позволяют построить следующие зависимости (рис. 2, 3).

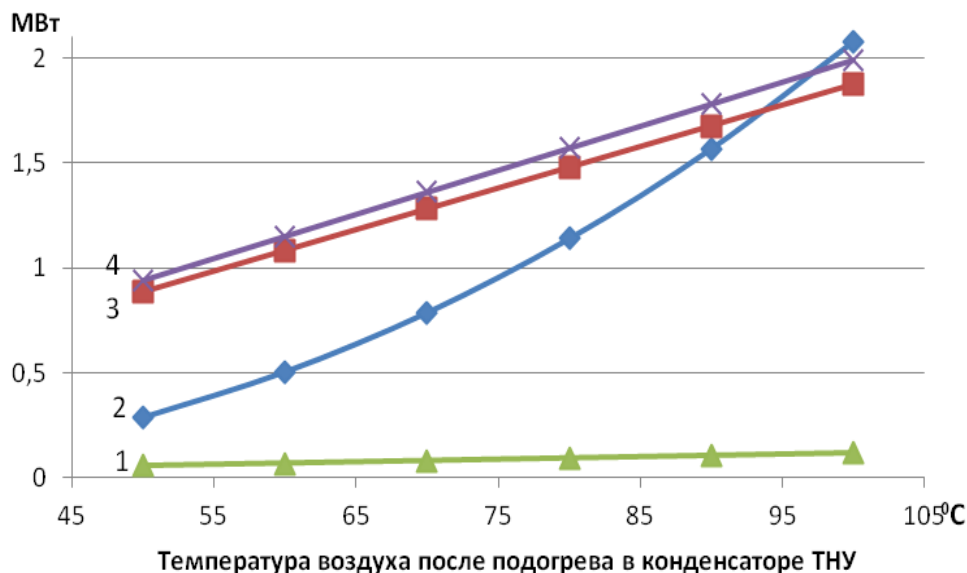


Рис. 2. Зависимость выработки электроэнергии и затрат на компрессор ТНУ от температуры воздуха после подогрева для хладона R-21:

1 – рост выработки электроэнергии турбиной за счет понижения температуры в конденсаторе; 2 – мощность компрессора; 3 – дополнительная выработка электроэнергии в турбине за счет возврата теплоты в цикл; 4 – суммарная дополнительная выработка электроэнергии

т.у.т. сут.

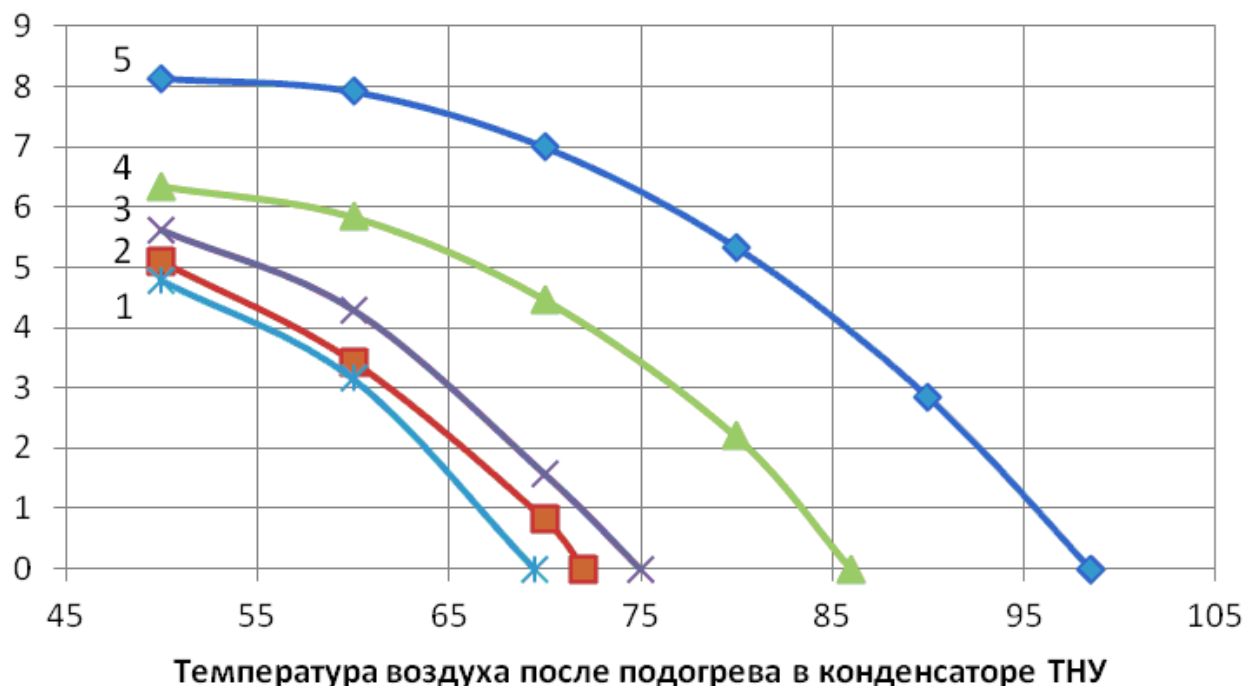


Рис. 3. Зависимость экономии топлива от температуры воздуха после подогрева для разных видов рабочего тела в ТНУ:  
1 – хладон R-600; 2 – хладон R-113; 3 – хладон R-123; 4 – хладон R-11; 5 – хладон R-21

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- рост выработки турбиной электроэнергии за счет понижения температуры воды в конденсаторе мал, потому что требуемой теплоты для нагрева воздуха недостаточно для того, чтобы существенно снизить температуру охлаждающей воды на входе в конденсатор (для нагрева воздуха с 5 °C до 100 °C понижение будет всего на 0,74 °C);
- существует «критическая» точка (в данном случае при 98 °C), после которой дополнительная выработка не будет покрывать мощность насоса, и предлагаемое техническое решение утратит целесообразность;
- для принятых граничных условий использование ТНУ для подогрева воздуха перед калориферами имеет практическую выгоду;
- очевидна целесообразность предлагаемого технического решения на конденсационных энергоблоках с оборотной системой технического водоснабжения;
- для использования предлагаемого технического решения на ТЭЦ необходимо дополнительное проведение расчетных исследований при работе турбоустановок по электрическому и тепловому графику.

## ПРЕИМУЩЕСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЭРОГЕЛЯ

Растущая стоимость получения традиционных видов энергии, общие мировые тенденции и политика Евросоюза призывают к ограничению потребления энергии и сокращению эмиссии газов, к поискам все более эффективных термоизолирующих материалов, даже без учета относительно высокой цены их производства. Главное требование к теплоизоляции, где бы ее ни использовали, – уменьшить скорость теплопередачи за счет теплопроводности, конвекции, излучения, а также любой комбинации этих механизмов. Сегодня для теплоизоляции в основном используют стекловолокна, минеральную вату и шлаковату. Однако сравнительно недавно на рынок вышли и быстро завоевали признание аэрогели – материалы высокотемпературной изоляции, уже используемые в промышленном производстве.

В переводе «аэрогель» означает «замороженный воздух», еще нередко его называют – «замороженный дым». Данный материал представляет собой гель, в котором жидкая фаза замещена газообразной. Аэрогель имеет очень малую плотность, а именно от 1 до 150 кг/м<sup>3</sup> и на ощупь напоминает легкую, но твердую пену. Несмотря на это, он может выдерживать нагрузку в тысячи раз больше своего веса. Оригинальные свойства кремниевому аэрогелю придает его пористая структура – переплетение цепочек из частиц диоксида кремния с диаметром 4–6 нм и пустотами размером от 20 до 100 нм [1].

Перечислим его основные свойства [2, 3]:

- очень низкая теплопроводность: в среднем от 0,014 до 0,021 Вт/(м·К);
- огнестойкий (широко используется при использовании в качестве теплоизоляции для трубопроводов и оборудования, нуждающихся в повышенной защите от огня);
- имеет малый объем (слой изоляции всего в 5 мм изолирует от очень высоких температур, тем самым уменьшая объем объекта строительства);
- безопасен (материалы на основе аэрогеля абсолютно безопасны для человека, что позволяет использовать их в работающих цехах и жилых помещениях);
- имеет легкий вес (материалы из аэрогеля на 95 % состоят из воздуха, а потому практически не утяжеляют веса конструкций);
- имеет простоту монтажа конструкции (изделия для изоляции поставляются в виде плоских элементов, что позволяет сократить транспортный объем и время монтажа изоляции труб отопления, водоснабжения, канализации и тех-

нологических трубопроводов, а также фитингов и технологического оборудования непосредственно на местах);

- гидрофобен (технология производства изоляции с аэрогелем позволяет всей влаге, которая попадает внутрь теплоизоляционного слоя, испаряться, что обеспечивает не только тепловую изоляцию труб, но и их эффективную защиту от коррозии);

- эффективен при ремонте (применение теплоизоляционных материалов на основе защищает конструкцию от воздействия погодных факторов);

- эстетичен (использование аэрогеля для изоляции придает объектам эстетичный внешний вид, обеспечивая благоприятные рабочие условия).

Теплоизоляционные материалы с аэрогелем используются для защиты элементов, находящихся вблизи высокотемпературных установок, для теплоизоляции трубопроводов, находящихся глубоко под землей, для теплоизоляции резервуаров различных размеров.

Таким образом, мы имеем возможность использовать уникальное вещество с превосходными теплофизическими свойствами для теплоизоляции. Этот материал способен сохранять свои свойства даже при резких перепадах температур и других сложных условиях. Совокупность этих свойств позволяет использовать утеплитель в самых сложных условиях и добиваться превосходного результата, касающегося создания надежной теплоизоляции.

#### Список литературы

1. Аэрогель – материал XXI века [Электронный ресурс]. URL: <http://scientificrussia.ru/partners/sibirskoe-otdelenie-ran/aerogel-material-hhi-veka> (дата обращения: 02.10.2014).
2. Теплофизические свойства (теплопроводность, плотность, температура применения) гибкой теплоизоляции на основе аэрогеля [Электронный ресурс]. URL: [http://thermalinfo.ru/publ/tverdye\\_veshhestva/stroitelnye\\_materialy/teplofizicheskie\\_svojstva\\_teploprovodnost\\_plotnost\\_temperatura\\_primenenija\\_gibkoj\\_teploizoljicii\\_na\\_osnove\\_aehrogelja/6-1-0-363](http://thermalinfo.ru/publ/tverdye_veshhestva/stroitelnye_materialy/teplofizicheskie_svojstva_teploprovodnost_plotnost_temperatura_primenenija_gibkoj_teploizoljicii_na_osnove_aehrogelja/6-1-0-363) (дата обращения: 02.10.2014).
3. Преимущества теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля [Электронный ресурс]. URL: <http://www.aerogel-russia.ru/info/preimuschestva-aerogel.html> (дата обращения: 02.10.2014).

УДК 697.34

Конышев Е. К.  
Тюменский государственный архитектурно-строительный университет  
[Evgeny\\_White@mail.ru](mailto:Evgeny_White@mail.ru)

### **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ ПО ТИПУ «ТРУБА В ТРУБЕ»**

В статье рассматривается повышение эффективности использования природных ресурсов в области теплоэнергетики и снижение потерь теплоты в трубопроводах путём использования тепловой сети типа «труба в трубе».

В докладе Министерства энергетики Российской Федерации «Политика теплоснабжения» (2013 г.) отмечается: «Реальные потери в тепловых сетях составляют до 20–30 % (за рубежом 6–8 %) и необходимо увеличивать темпы перекладки сетей минимум до 6 % в год от их протяженности».

В данной работе приведено экономическое обоснование теплосети по типу «труба в трубе». Использование данного решения приводит к снижению расхода углеводородного топлива на котельных установках и одновременно происходит снижение тепловых потерь при транспортировке в сравнении с классической тепловой двухтрубной сетью.

Тепловая сеть, функционирующая по типу «труба в трубе», представляет собой тепловую схему, в которой прямая линия с «горячим» теплоносителем поступает к потребителю по внутренней трубе, а обратная по кольцевому сечению и подогревается от прямой линии. Это позволяет получить более высокую температуру в конце обратной линии (см. рисунок).

Прямая линия сети устанавливается во внешней трубе на специальных распорках, имеющих прямоугольную форму со скругленными концами, угол между которыми составляет 120 °, что уменьшает гидравлические сопротивления.

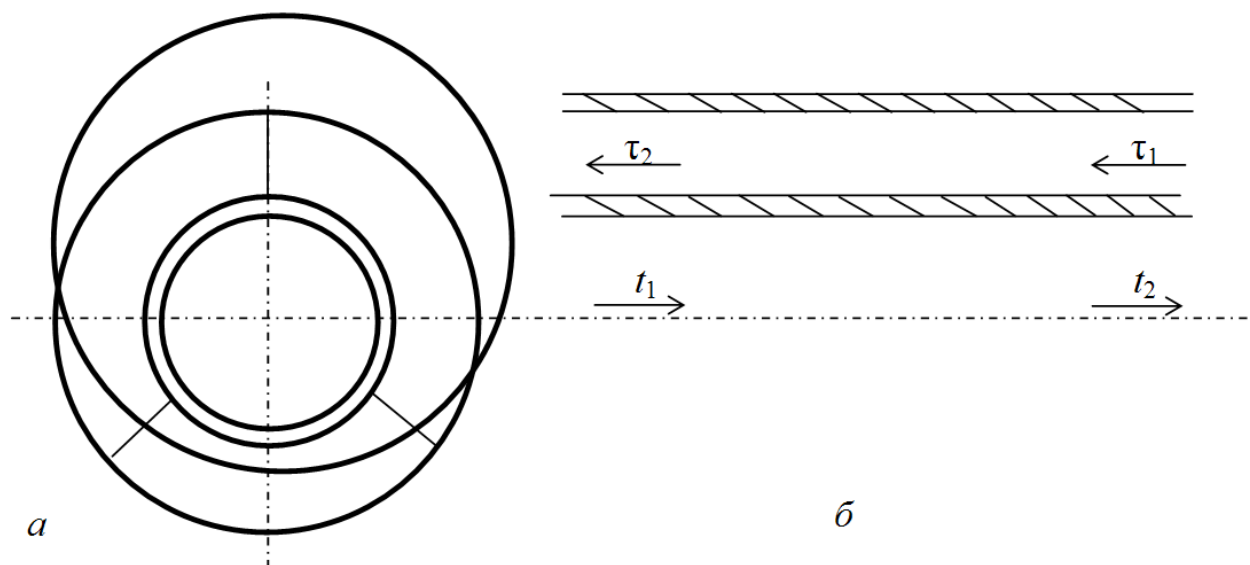


Схема тепловой сети типа труба в трубе:

*a* – поперечное сечение теплотрассы; *б* – сечение вдоль теплотрассы

Параметры сетевой воды для классической схемы тепловой сети принимаем при температуре наружного воздуха  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , по опытным данным:  $t_1 = 101\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_2 = 76\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau_1 = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau_2 = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho = 958$ ;  $\omega = 2\text{ м/с}$ .

Размеры трубы классической тепловой сети:  $d = 0,63\text{ м}$ ;  $l = 18\text{ км}$ ;  $\delta = 0,008\text{ м}$ ;  $\delta_{\text{из}} = 0,1\text{ м}$ .

$$t_2 = t_{\text{гр}} + (t_1 - t_{\text{гр}}) \cdot e^{-\frac{kH}{MC_p}}, \quad (1)$$

$$k = \ln \frac{(t_1 - t_{\text{гр}})}{(t_2 - t_{\text{гр}})} \cdot M \cdot C_p / H = \ln \frac{(101 - 8)}{(76 - 8)} \cdot 541,4 \cdot 4,187 / 33912 = 0,0209 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{С},$$

где  $t_1$  – начальная температура теплоносителя,  $^\circ\text{С}$ ;  $t_2$  – конечная температура теплоносителя,  $^\circ\text{С}$ ;  $t_{\text{гр}}$  – температура греющей среды, которую принимаем равной температуре грунта  $8 \text{ } ^\circ\text{С}$ ;  $M$  – массовый расход теплоносителя;  $C_p$  – изобарная теплоемкость теплоносителя, принимается равной  $4,187 \text{ кДж/кг}\cdot^\circ\text{С}$ ;  $H$  – поверхность теплообмена,  $\text{м}^2$ .

Определяем конечную температуру прямой линии теплотрассы типа «труба в трубе» по уравнению Шухова [1], массовые расходы в тепловых сетях принимаем одинаковыми:

$$t_2 = t_{\text{гр}} + (t_1 - t_{\text{гр}}) \cdot e^{-\frac{kH}{MC_p}} = 70 + (101 - 70) \cdot e^{-\frac{0,020933912}{541,44,187}} = 92 \text{ } ^\circ\text{С},$$

где  $t_{\text{гр}}$  – температура грунта, которую мы принимаем равной температуре обратной линии  $70 \text{ } ^\circ\text{С}$ ;  $t_1$  – начальная температура теплоносителя, принимается равной начальной температуре теплоносителя для классической схемы теплосетей,  $^\circ\text{С}$ ;  $k$  – коэффициент теплопередачи принимается равным коэффициенту теплопередачи для классической схемы теплосети,  $\text{Вт/м}^2\cdot^\circ\text{С}$ ;  $H$  – поверхность теплообмена, принимается равной поверхности теплообмена классической схемы тепловой сети: так, по диаметру внутренняя труба тепловой сети типа «труба в трубе» равна трубе классической теплосети,  $\text{м}^2$ ;  $M$  – массовый расход горячей воды;  $C_p$  – теплоемкость теплоносителя при постоянном давлении, принимается равной  $4,187 \text{ кДж/кг}\cdot^\circ\text{С}$ .

Определяем конечную температуру обратной линии тепловой сети типа «труба в трубе» по уравнению теплового баланса, теплоемкости и массовые расходы горячей воды в подающей и обратной линии считаем равными:

$$M_1 \cdot C_{p1}(t_1 - t_2) = M_2 \cdot C_{p2}(\tau_1 - \tau_2), \quad (2)$$

$$\tau_2 = t_2 - t_1 + \tau_1, \quad (3)$$

$$\tau_2 = 92 - 101 + 92 - 16 = 67 \text{ } ^\circ\text{С},$$

где  $\tau_1$  – начальная температура теплоносителя в обратной линии, принимается ниже конечной температуры теплоносителя в прямой линии на  $16 \text{ } ^\circ\text{С}$ .

Основной проблемой тепловых сетей являются тепловые потери в окружающую среду, то есть полезно не использующееся тепло. Причины этого – износ и несовершенство теплоизоляции.

Определим тепловые потери в грунт в подающей линии тепловой сети классической схемы:

$$Q_{\text{гр1}} = k\pi D l \frac{(t_1 - t_2)}{\ln\left(\frac{t_1 - t_{\text{гр}}}{t_2 - t_{\text{гр}}}\right)} = 0,0209 \cdot 3,14 \cdot 0,846 \cdot 18000 \frac{(101 - 76)}{\ln\left(\frac{101 - 8}{76 - 8}\right)} = 80592,96 \text{ кДж}, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{кДж/кг}\cdot^\circ\text{С}$ ;  $D$  – наружный диаметр трубы с теплоизоляцией,  $\text{м}$ ;  $l$  – длина подающего участка тепловой сети,  $\text{м}$ ;  $t_1$  – начальная температура теплоносителя в подающей линии,  $^\circ\text{С}$ ;  $t_2$  – конечная температура

тура теплоносителя в подающей линии, °С;  $t_{гр}$  – температура грунта, ранее принятая 8 °С, остается.

Определим тепловые потери в грунт в обратной линии тепловой сети классической схемы по формуле [4]:

$$Q_{гр2} = k\pi D l \frac{(\tau_1 - \tau_2)}{\ln\left(\frac{\tau_1 - t_{гр}}{\tau_2 - t_{гр}}\right)} = 0,0209 \cdot 3,14 \cdot 0,846 \cdot 18000 \frac{(58 - 44)}{\ln\left(\frac{58 - 8}{44 - 8}\right)} = 42396,78 \text{ кДж.}$$

Суммарные потери в грунт по всей длине классической тепловой сети:

$$Q_{гр} = Q_{гр1} + Q_{гр2} = 80592,96 + 42396,78 = 122989,74 \text{ кДж.}$$

Определим тепловые потери в грунт для тепловой сети типа «труба в трубе» по формуле [4]:

$$Q_{гр2} = k\pi D l \frac{(\tau_1 - \tau_2)}{\ln\left(\frac{\tau_1 - t_{гр}}{\tau_2 - t_{гр}}\right)} = 0,0209 \cdot 3,14 \cdot 1,46 \cdot 18000 \frac{(76 - 67)}{\ln\left(\frac{76 - 8}{67 - 8}\right)} = 110870,44 \text{ кДж.}$$

Расход газа, необходимого на догрев воды при использовании классической схемы тепловой сети (коэффициент полезного действия котлоагрегата принимаем 95 %):

$$B = \frac{Q}{Q_p^H \cdot \eta} = \frac{124676,3}{35176 \cdot 0,95} = 3,73 \text{ м}^3 / \text{с}, \quad (5)$$

где  $Q$  – количество теплоты, необходимое на догрев топлива в котельной, кДж;  $Q_p^H$  – низшая рабочая теплота сгорания используемого газа, кДж/м<sup>3</sup>;  $\eta$  – коэффициент полезного действия котлоагрегата.

Расхода газа, необходимого на догрев воды при использовании тепловой сети типа «труба в трубе», определяется по формуле [5]:

$$B = \frac{Q}{Q_p^H \cdot \eta} = \frac{74805,8}{35176 \cdot 0,95} = 2,23 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Определим разницу годового расхода денежных средств на топливо:

$$\Delta B_o = (B_{год1} - B_{год2}) \cdot 4,241 = (68321664 - 40846464) \cdot 4,241 = 116\,522\,323,2 \text{ руб./год}, \quad (6)$$

где  $B_{год1}$  – годовой расход газа при использовании классической тепловой схемы, м<sup>3</sup>/год;  $B_{год2}$  – годовой расход газа при использовании тепловой схемы типа «труба в трубе», м<sup>3</sup>/год; 4,241 – стоимость 1 м<sup>3</sup> газа, руб.

Определим денежную разницу тепловых потерь в окружающую среду:

$$\Delta Q_d = (Q_{гр1} - Q_{гр2}) \cdot 1029,8 = (122989,74 - 110870,44) \cdot 1029,8 \cdot 2,39 = 29828287,75 \text{ руб.}, \quad (7)$$

где  $Q_{гр1}$  – тепловые потери в окружающую среду классической тепловой сети, кДж;  $Q_{гр2}$  – тепловые потери в окружающую среду тепловой сети типа «труба в трубе», кДж; 2,39 – переводной коэффициент.

По результатам проведенных расчётов экономической эффективности использования предлагаемой схемы оказывается, что применение данной тепловой сети приводит к уменьшению расхода газа на 67 % и к годовой экономии



денежных средств в размере 116,5 млн руб., кроме того, в этом случае уменьшаются теплопотери на 10 % за один циркуляционный цикл горячей воды, что дополнительно приводит к экономии 29,8 млн руб.. Вместе с тем оказывается, что конструкция предлагаемой схемы сложнее из-за применения распорок, на которых фиксируется подающая линия сети и возрастает перепад давления, что приводит к увеличению мощности на 23 % и расходу электроэнергии (542 тыс. руб.).

Вместе с тем данная схема приводит к увеличению затрат вследствие разной цены применяемых труб обратных линий (для новой схемы используется труба большего диаметра, и это приводит к дополнительным расходам металла на подпорки в размере 3,82 м<sup>3</sup>, что приводит к увеличению расходов на 221 млн руб. и стоимости прокладки на 8 млн руб.).

Однако в результате снижения потребления газа и уменьшения тепловых потерь окупаемость тепловой сети, функционирующей по принципу «труба в трубе», составляет менее двух лет и оказывается рентабельной.

#### Список литературы

1. Лебедев П. Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. М. : Энергия, 1972. 250 с.
2. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. М. : Энергоиздат, 1983. 195 с.
3. Теплотехника : учебник для вузов / под ред. В. Н. Луканина. М. : Высшая школа, 1999. 197 с.
4. СНиП 2.04.07–86. Тепловые сети. М. : Госстрой, 2001. 48 с.
5. Коньшев Е. К. Оценка эффективности теплотрассы типа «труба в трубе» по сравнению с классической теплотрассой // Сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 20-22 апреля 2013 г. Челябинск, 2013.

УДК 620.9

Кордюкова Л. С., Бакрунова Т. С.  
Самарский государственный технический университет  
kordl150494@mail.ru

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ КАК ОСНОВА ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКОНОМИКИ СТРАНЫ

Среди важнейших проблем, поставленных наукой и практикой, особое место занимает проблема энергосбережения. Энергосбережение в экономике России поднято на уровень государственной политики. Главные направления и важнейшие мероприятия по развитию топливно-энергетического комплекса страны и повышению эффективности энергоиспользования отражены в законе Российской Федерации «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...», подписанным Д.А. Медведевым в ноябре 2009 года [1].

Согласно закону, *энергосбережение* – это реализация организационных, правовых, технических, технологических, экономических и иных мер, направ-

ленных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования (в том числе объема произведенной продукции, выполненных работ, оказанных услуг). С этим термином также тесно связано понятие энергоэффективности. *Энергетическая эффективность* – характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю.

Во многих документах и публикациях термин энергосбережение используется как обозначение нового энергетического ресурса. Смысл таков: энергосбережение, обеспечивая эффективное использование энергоресурсов и снижая потери, улучшает структуру топливно-энергетического баланса, само тем самым становится своеобразным энергетическим ресурсом.

Но с другой стороны – энергосбережение это деятельность значительного числа лиц и организаций. Результаты этой деятельности крайне неоднородны по длительности реализации и длительности эффекта, затратам, эффективности, трудоемкости [2].

Анализ большого числа энергосберегающих мероприятий позволил таким образом выявить три группы мер:

1 группа – организационные (малозатратные) мероприятия, обеспечивают, в первую очередь, наведение технологического порядка, укрепление дисциплины производства, выявление и устранение элементарных потерь, применение организационно-управленческих решений. Примерами таких мероприятий служат: проведение энергетических обследований, обучение в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, разработка и внедрение системы энергетического менеджмента, оснащение счетчиками энергии, нормирование и контроль расходов энергии по видам деятельности, осуществление энергосберегающих графиков работы и т. п.;

2 группа – технологические мероприятия, суть которых состоит в технологическом переустройстве, рационализации производства без крупных капиталовложений в основном за счет текущих расходов: установки компенсации реактивной мощности; использование тепловой изоляции; настройка и авторегулирование агрегатов – примеры технологического энергосбережения;

3 группа – инвестиционные мероприятия, предусматривающие коренную реконструкцию технологии, производства. Реализация этих мероприятий требует серьезных инвестиционных средств.

Таким образом, наличие обособленных групп мероприятий дает основание считать, что неправомерно сравнивать эффективность мероприятий из этих групп. Сроки, цели, задачи, результаты мероприятий из этих групп принципиально различны. Это разнородные явления, три группы разных мероприятий, имеющих название «энергосбережение», примеры которых описаны ниже.

Пример мероприятий из первой группы – оснащение счетчиками энергии. Для учета количества израсходованной воды и пара используют соответственно счетчики воды и пара, расход тепловой энергии измеряется теплосчетчиками.

Метрологические характеристики этих приборов (погрешность, диапазон измерения, межповерочный интервал и др.) должны быть удостоверены сертификатом Госстандарта РФ.

Определение тепловой энергии, передаваемой теплоносителем, осуществляется путем косвенного измерения объема поступившего теплоносителя, его температуры и давления до и после отдачи теплоты.

Для обработки результатов измерения расхода теплоносителя и его параметров в составе теплосчетчика имеется вычислительное устройство, использование которого возможно также и для выполнения целого ряда дополнительных функций.

Таким образом, приборы, обеспечивающие все измерительные операции, необходимые для учета параметров теплоносителя и тепловой энергии в составе узлов учета, это – счетчики воды или пара, теплосчетчики и тепловычислители.

Наряду с измерениями и обработкой результатов измерений приборы учета должны выполнять также дополнительные функции по хранению и регистрации информации о потребленных количествах теплоносителя и тепловой энергии, а также о режимах теплоснабжения. Ряд современных теплосчетчиков могут обеспечить выполнение практически всех функций по измерению, обработке, хранению и регистрации информации.

Пример из второй группы – использование тепловой изоляции. В энергетике объектами тепловой изоляции являются паровые котлы, газоходы, паровые и газовые турбины, теплообменники, баки-аккумуляторы горячей воды, дымовые трубы. В промышленности тепловой изоляции подлежат вертикальные и горизонтальные технологические аппараты, насосы, теплообменники, резервуары для хранения воды, нефти и нефтепродуктов. Особенно высокие требования предъявляются к эффективности тепловой изоляции низкотемпературного и криогенного оборудования.

К основным требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам и конструкциям, относят следующие:

- теплотехническая эффективность;
- эксплуатационная надежность и долговечность;
- пожарная и экологическая безопасность.

Основными показателями, характеризующими физико-технические и эксплуатационные свойства теплоизоляционных материалов, являются: плотность, теплопроводность, температуростойкость, сжимаемость и упругость (для мягких материалов), прочность на сжатие при 10 % деформации (для жестких и полужестких волокнистых материалов), вибростойкость, формостабильность, горючесть, водостойкость и стойкость к воздействию химически агрессивных сред, содержание органических веществ и биостойкость.

Тепловая изоляция является необходимым элементом промышленного оборудования, обеспечивающим принципиальную возможность проведения высоко- и низкотемпературных технологических процессов в энергетике и промышленности при оптимальном потреблении топливно-энергетических ресурсов.

Третья группа состоит из долгосрочных высокозатратных мероприятий, к которым относятся:

1. Строительство новых крупных тепло- и водоисточников.
2. Модернизация действующих котельных и насосных станций с установкой высокопроизводительного котельного оборудования и насосных агрегатов.
3. Использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (биогаза, геотермальных вод, солнечной энергии, ветровой энергии, применение тепловых насосов и т. п.).
4. Прокладка новых или капитальный ремонт существующих тепловых магистралей с использованием труб с пенополиуретановой теплоизоляцией, обеспечивающей снижение тепловых потерь в 2–3 раза.
5. Прокладка новых или капитальный ремонт действующих водопроводных сетей с использованием труб с внутренними покрытиями.
6. Утепление наружных стеновых ограждений зданий с использованием жестких плит и гибких матов, замена оконных блоков.

Таким образом, в настоящее время энергосбережение приняло на вооружение большое количество эффективных технологий и новое оборудование, позволяющее значительно (до 50 % и более) повысить надежность и экономичность работы уже существующих тепловых систем, а также проектировать новые системы, качественно отличающиеся от уже существующих.

#### Список литературы

1. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (в ред. от 04.10.2014) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. URL: [http://base.garant.ru/12171109/1/#block\\_100](http://base.garant.ru/12171109/1/#block_100) (дата обращения: 28.10.2014).
2. Губин В. Е., Литвак В. В. Энергосбережение в теплоэнергетике. Томск : ТПУ, 2009. 69 с.

УДК 620.97

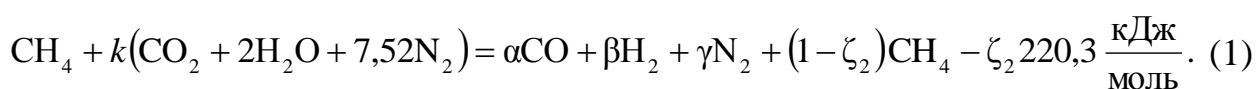
Корнилин М. И.  
Самарский государственный технический университет  
maksim993@mail.ru

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ**

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» [1]: необходимо осуществить снижение к 2020 году энергоёмкость валового внутреннего продукта Российской Федерации не менее чем на 40 % по сравнению с 2007 годом, а также обеспечить рациональное и экологически ответственное использование энергии и ресурсов.

Представляет интерес для большого числа огнетехнических установок утилизация теплоты высокотемпературных отходящих дымовых газов за счет термохимической регенерации (ТХР) за счет конверсии природного газа продуктами его полного сгорания. Сущность ТХР тепла отходящих дымовых газов, как показал Семененко [2], заключается в использовании их физического тепла для предварительной эндотермической переработки исходного топлива, которое при этом получает большой запас химически связанного тепла. Это дополнительное химически связанное тепло топлива, а также тепло нагретого воздуха реализуется в рабочей камере огнетехнической установки, что обеспечивает соответствующее повышение её температурного уровня и снижение удельного расхода топлива.

Общее уравнение процесса можно записать:



При условии полного окисления метана и стехиометрического расхода дымовых газов коэффициенты перед соответствующими компонентами реакции будут равны:

$$k = \frac{1}{3}; \alpha = \frac{4}{3}; \beta = \frac{8}{3}; \gamma = 2,51; \zeta_2 = 1.$$

Теоретические предпосылки возможности осуществления термохимической регенерации можно взять из работ академика Лаврова. Так, в работе [3], при рассмотрении вопроса неполного горения метана при  $\alpha = 0,3-0,5$  (воздушно-кислородная конверсия), было выдвинуто предположение двухстадийного характера окисления метана.

Сущность термохимической регенерации тепла отходящих газов заключается в использовании их физического тепла для предварительной эндотермической переработки исходного топлива, которое при этом получает большой запас химически связанного тепла и нагревается до высокой температуры [1].

Принципиальная схема способа термохимической регенерации теплоты за счет конверсии природного газа продуктами его полного сгорания приведена на рис. 1.

После теплотехнологической установки 2 дымовые газы *a* разделяются на два потока, первый поток *b* подается в реакционное пространство термохимического реактора 3 активированного никельсодержащим катализатором, в который также подается природный газ *d*, где, в результате протекания реакций (1), образуется конвертированный газ *e*, содержащий горючие компоненты CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Второй поток дымовых газов *c* направляется на поверхностный обогрев реактора. Остаточная теплота второго потока дымовых газов утилизируется в рекуперативном воздухоподогревателе 1, в котором происходит нагрев холодного дутьевого воздуха *i* до температуры горячего воздуха *h*, в результате чего дымовые газы *f* охлаждаются до температуры потока *g*.

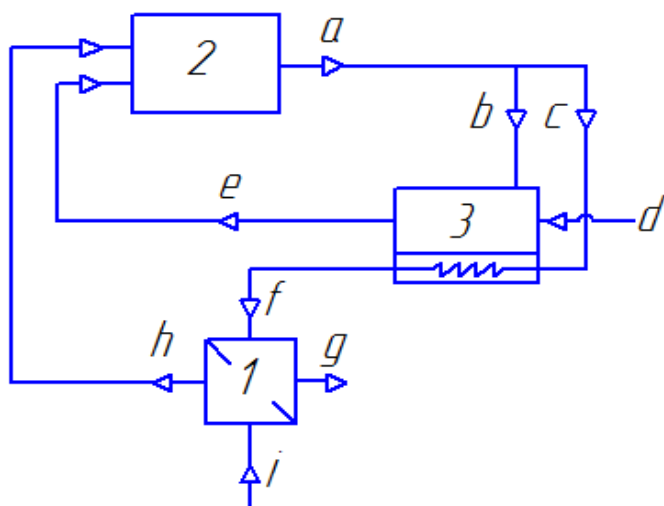


Рис. 1. Принципиальная схема установки с термохимической регенерацией теплоты отходящих дымовых газов

В качестве термохимического реактора эффективнее всего применять либо пластинчатый, либо трубчатый реактор для паровой конверсии метана, предварительно активировав часть реакционного пространства реактора катализаторами углекислотной конверсии. Возможные конструкции трубчатого (а) и пластинчатого (б) реакторов приведены на рис. 2.

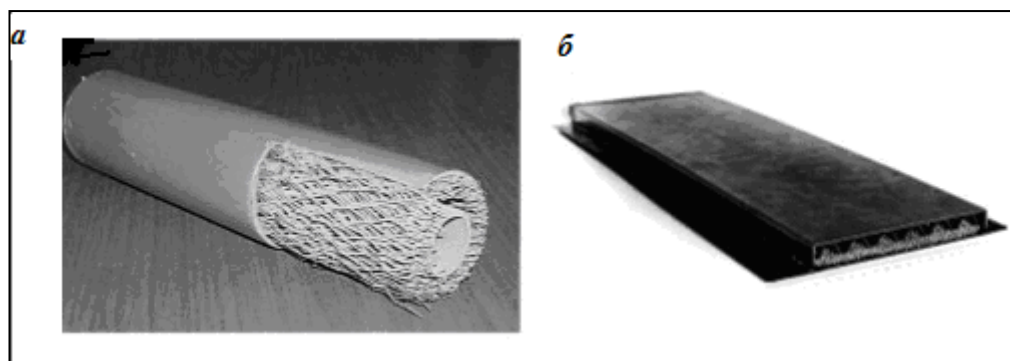


Рис. 2. Трубчатый – а и пластинчатый – б термохимические реакторы

Предварительные технико-экономические расчёты показали значительное увеличение КПД промышленных огнетехнических установок при утилизации теплоты отходящих дымовых газов по предложенному способу.

Справедливость данной схемы для интервала температур 700–1600 К была подтверждена экспериментальными данными [4].

В [3] показано, что для получения смеси  $\text{CO} + \text{H}_2$  необходимо и достаточно наличие газовой смеси исходного состава:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и минимального температурного потенциала для протекания эндотермических реакций (1). Данное предположение позволяет нам рассматривать продукты полного сгорания метана как исходные вещества для реакции (1) при необходимом температурном потенциале. В результате протекания описанного процесса произойдёт превращение физической теплоты дымовых газов (необходимого температурного потенциала) в химическую энергию продуктов реакции. Другими словами, осуществляется процесс термохимической регенерации теплоты отходящих дымовых газов.

#### Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации № 889 от 4.06.2008. «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/193388/> (дата обращения: 13.10.2014).
2. Семененко Н. А. Вторичные энергоресурсы промышленности и энерготехнологическое комбинирование / М. : Энергия, 1983.
3. Лавров Н. В. Физико-химические основы процесса горения топлива / М. : Наука, 1971.
4. Каширский В. Г., Лункин В. Н., Удалов В. П.. Расчётные характеристики процессов неполного горения топлива. М. : Энергия, 1974.

УДК 697.34

Кубасов Г. С., Бакрунова Т. С.  
Самарский государственный технический университет  
122erik122@mail.ru

### **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ**

В настоящее время все больше внимания уделяется вопросам энергосбережения и оплаты энергоносителей. Особенно сложная ситуация наблюдается в системе оплаты тепла, когда потребитель оплачивает потери в не принадлежащих ему теплотрассах, которые достигают, а иногда и превышают 20 % от объема передаваемого тепла. Как следствие, наблюдается снижение в зимнее время температуры воздуха в жилых и производственных помещениях из-за недогрева воды в системах централизованного теплоснабжения и непрерывный рост финансовых затрат на теплоснабжение из-за повышения тарифов на тепловую энергию.

Перспективным подходом к разрешению сложившейся ситуации служит ввод в эксплуатацию автоматизированных тепловых пунктов (АТП) с коммерческим узлом учета тепла, который отражает фактическое потребление тепловой энергии потребителем и позволяет отслеживать текущее и суммарное потребление тепла за заданный промежуток времени [1].

Тепловые пункты подразделяются на:

- индивидуальные тепловые пункты (ИТП), служащие для присоединения систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения и технологических теплоиспользующих установок только одного здания или его части;
- центральные тепловые пункты (ЦТП), выполняющие те же функции, что и ИТП для двух зданий или более;
- поквартирный тепловой пункт (КТП) – тепловой пункт, обслуживающий одну квартиру. Обеспечивает жителей горячей и холодной водой круглогодично и теплом в отопительный период.

Достоинства автоматизированного ИТП следующие:

1. Общая длина трубопроводов тепловой сети сокращается в 2 раза.

2. Отсутствие тепловой сети и, как следствие, минимальные расходы на строительство и теплоизоляционные материалы.

3. Расход электроэнергии на перекачку теплоносителя снижается на 20–40 %.

4. За счет автоматизации регулирования отпуска тепла конкретному абоненту (зданию) экономится до 15 % тепла на отопление.

5. Значительно сокращается аварийность сетей, особенно за счет исключения из теплосети трубопроводов горячего водоснабжения.

6. Автоматически поддерживаются комфортные условия проживания за счет контроля параметров теплоносителей: температуры и давления сетевой воды, воды системы отопления и водопроводной системы; температуры воздуха в отапливаемых помещениях (в контрольных точках) и наружного воздуха.

7. Оплата потребляемого каждым зданием тепла осуществляется по фактически измеренному расходу за счет использования приборов учета.

8. Появляется возможность существенно снизить затраты на внутридомовые системы отопления за счет перехода на трубы меньшего диаметра, применение неметаллических материалов, пофасадно разделенных систем.

9. Обеспечивается экономия тепла, затраты на монтажные работы сокращаются за счет полного заводского исполнения. Срок окупаемости – менее двух лет. Экономия тепловой энергии составляет около 20–30 %.

Экономическая эффективность применения АТП:

1. Снижение температуры воздуха в помещениях в часы отсутствия там людей – ночное время и выходные дни (для административных и производственных зданий). Это, примерно, 10–30 % экономии.

2. Снятие вынужденных «перетоков» в переходные, межсезонные периоды (как для жилья, так и для административных или производственных объектов отопления). Применение регулирования температуры в системе отопления (СО) на АТП позволяет сэкономить от 30 до 40 % в эти периоды. С учётом кратковременности данных периодов доля экономии в годовом теплопотреблении составляет порядка 2–6 %.

3. Снятие влияния на потери тепла инерции тепловой сети (ТС) – данный фактор наиболее эффективен при подключении ТП к крупным ТС, например, сетям от ТЭЦ (как для объектов ЖКХ, так и для административно-промышленных объектов). Экономия по данному фактору можно оценить только ориентировочно – порядка 3–5 % от общего объёма теплопотребления.

4. Экономический эффект за счёт применения графика качественного регулирования и поддержания постоянства расхода (постоянства перепада давления) в СО (как для жилых, так и для административных и производственных объектов). Применение данного фактора позволяет экономить около 4 % годового теплопотребления.

5. Учёт тепловыделений при управлении температурой отопления (для жилья). Применение специальных алгоритмов для жилых зданий может позволить сэкономить до 7 % общего теплопотребления для этих зданий. Реализовать данный график возможно только на индивидуальном АТП.



6. Возможность нормированного снижения нагрузки на отопление в часы максимальной нагрузки на горячее водоснабжение (для жилья). Это позволяет дополнительно добиться 1–3 % экономии.

7. Коррекция температурного графика по фактической производительности приборов отопления и с учётом мероприятий по энергосбережению архитектурно-строительного характера (как для жилья, так и для административно-производственных объектов). Эффект экономии от автоматизации в данном случае может составить величину в пределах 7–15 %.

Суммарная средняя экономия от внедрения АТП: для жилых зданий составляет от 20 до 40 % от общего объёма теплопотребления, а для объектов административного и производственного назначения от 25 до 60 %.

Мониторинг фирмы *Danfoss* и последующий анализ работы 43 автоматизированных блочных ТП с пластинчатыми теплообменниками в Иркутске показал впечатляющие результаты [2]:

- температура воздуха в отапливаемых помещениях зданий поднялась с 10–16 до 20–22 °С;
- температура воды в системе ГВС вошла в норму и составила 60 °С, в результате чего уменьшился расход горячей воды со 149 л/чел. в сутки до 128 л/чел.;
- средняя экономия тепловой энергии за отопительный сезон составила 27 %, а в весенний и осенний периоды достигала 45–55 %;
- теплопроизводительность источника энергии сократилась на 8,5 %;
- циркуляционный расход сетевой воды снизился на 28 %;
- экономия электроэнергии на перекачку теплоносителя составила 15 %;
- объем подпитки на источнике энергии уменьшился на 39 %;
- максимальная температура теплоносителя поднялась со 104 до 115 °С;
- температура теплоносителя в обратной магистрали понизилась на 6–8 °С;
- полезно используемый перепад температур теплоносителя увеличился с 20–25 до 40–60 °С;
- улучшились теплогидравлические режимы работы всей системы теплоснабжения.

С учетом этих данных следует сделать вывод о том, что необходимо переходить на индивидуальные автоматизированные тепловые пункты, так как их применение обеспечивает высокую эффективность работы системы при достаточно малом сроке окупаемости инвестиций.

#### Список литературы

1. СП 41-101-95. Проектирование тепловых пунктов. М. : Госстрой, 1995. 44 с.
2. Стандартные автоматизированные блочные тепловые пункты *Danfoss* : пособие RB.00.S6.50. М. : Данфосс, 2011. С. 6 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.danfoss.com/russia/> (дата обращения: 21.11.2014).

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ANSYS FLUENT

Технология псевдооживления широко используется в химической, энергетической и других отраслях промышленности. В настоящее время в связи с развитием численного моделирования процессов на ЭВМ возник ряд проблем, связанных с описанием межфазного взаимодействия. Преимущественно выделяют два различных подхода: дискретное моделирование частиц (discrete element modelling with computational fluid dynamics (DEM-CFD)) и двухфазное моделирование (two-fluid modelling (TFM)). Основное отличие между ними заключается в том, что DEM-CFD моделирует частицы как отдельные объекты, применяя к ним уравнения Ньютона, в то время как TFM рассматривает частицы как непрерывную фазу, используя механику сплошной среды для расчета.

В данной работе рассмотрено моделирование слоя при помощи встроенной в ANSYS модели Эйлера, которая позволяет изучать течение плотной фазы твердых частиц с учетом сложного взаимодействия между фазами. Несмотря на строгий математический аппарат модели, законы сопротивления, используемые в ней, по-прежнему полуэмпирические по своей сути. Именно поэтому необходимо использовать закон сопротивления, который позволяет достоверно предсказать зарождение или минимум условий псевдооживления. В настоящей работе использовался встроенный в ANSYS закон сопротивления Syamlal-O'Brien.

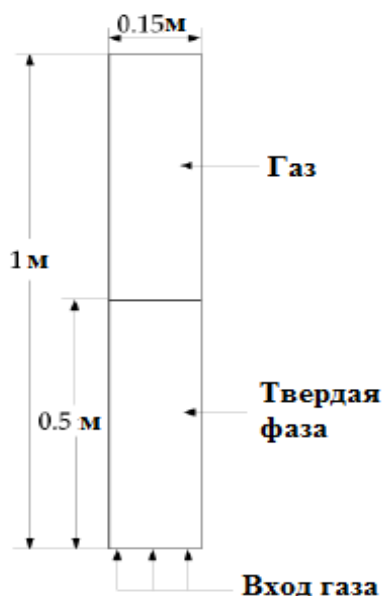


Рис. 1. Схема установки

Размеры установки показаны на рис. 1. Воздух входит со скоростью 0,25 м/с. Объемная доля твердых частиц в слое составляет 0,55. Плотность частиц в слое составляет 2600 кг/м<sup>3</sup>, а плотность воздуха принимается равной 1,2 кг/м<sup>3</sup>.

В результате расчета получено распределение (рис. 2) по объему частиц слоя. В процессе псевдооживления наблюдаются характерные пузыри. В целом данные соответствуют реальной картине процесса при заданных параметрах, однако необходима более тонкая настройка для получения более точных результатов, которые могут служить для анализа падений давления в слое.

В дальнейшей работе планируется определить идеальные параметры закона сопротивления, а также сравнить различные способы моделирования псевдооживленного слоя для изучения пульсаций давления. Создание точной модели процесса позволит найти оптимальные параметры сжигания топлива.

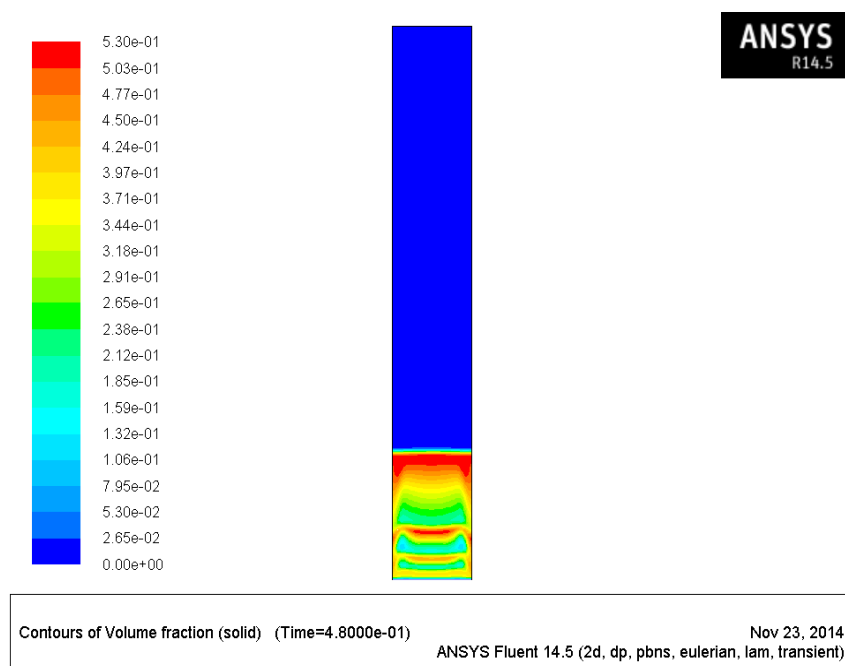


Рис. 2. Распределение по объему твердой фракции

#### Список литературы

1. ANSYS Modeling Uniform Fluidization in 2D Fluidized Bed. 2011.
2. Novel fluid grid and voidage calculation techniques for a discreteelement model of a 3D cylindrical fluidized bed. Christopher M. Boyce, Daniel J. Holland, Stuart A. Scott, John S. Dennis. // Computers and Chemical Engineering. 2014. № 65.

УДК 662.933

Лоншаков А. С.  
Вятский государственный университет, г. Киров  
AlexLo90@mail.ru

## ОБ ОЦЕНКЕ ШЛАКОВАНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ НЕПРОЕКТНЫХ УГЛЕЙ НА ТЭС

Эффективная работа и выбор оборудования угольных ТЭС в определяющей мере зависят от характеристик топлива. В настоящее время знание характеристик топлива и умение их использовать особенно актуальны в условиях неопределенности и изменения топливного баланса некоторых ТЭС. Оценка в ряде случаев только стоимостных показателей и теплоты сгорания топлива приводит к поставке на ТЭС непригодных углей или к серьезным ограничениям в работе оборудования.

При проектировании котельное оборудование рассчитывается как работающее на проектном топливе, так и на топливе улучшенного/ухудшенного качества. Топливо, характеристики которого не учтены в технологии его сжигания и конструкции оборудования, реализующего эту технологию, относится к непроектному. Под таким твердым топливом подразумеваются угли, марки и месторождения которых отличны от проектных, а также низкосортные угли той же марки и того же месторождения с качественными характеристиками, не соответствующими проектным показателям. Основными сертификационными показателями углей являются: теплота сгорания, зольность, влажность, выход летучих веществ, содержание серы и азота; химический состав золы, её температура плавления; гранулометрический состав; коэффициент размолотоспособности.

Одним из наиболее важных вопросов при использовании непроектных марок угля является возможное интенсивное шлакование топки котла. Шлакование связано с особыми свойствами золы – образовывать легкоплавкие компоненты, которые испаряются в среде топочных газов, а затем конденсируются на относительно холодных поверхностях нагрева, образуя липкие отложения.

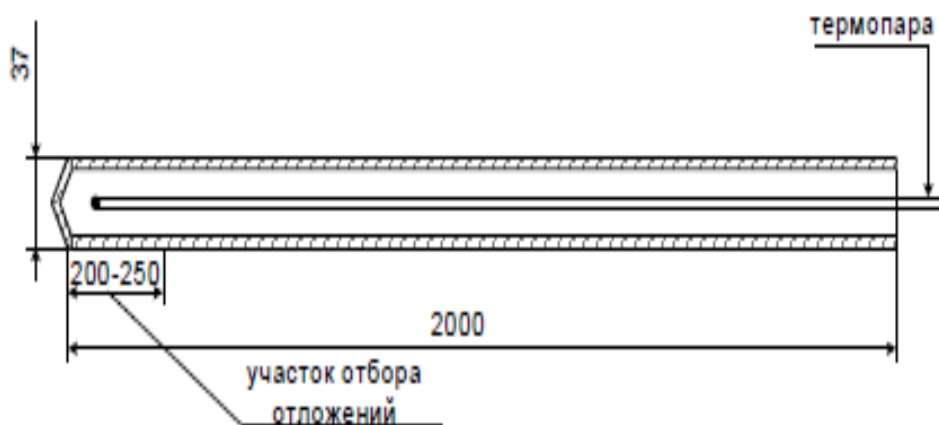


Рис. 1. Зонд для определения температуры начала шлакования

На практике одним из методов определения интенсивности образования отложений является определение температуры начала шлакования с помощью неохлаждаемых зондов по методике ВТИ (рис. 1).

Характеристиками шлакующих свойств твердого топлива, как известно, являются: температура начала шлакования  $t_{\text{нш}}$ , выше которой наблюдается неограниченный рост вторичных отложений, и прочность первичных отложений. Неохлаждаемый зонд представляет собой трубку из нержавеющей стали длиной 2 м и диаметром 32 мм, заваренную с одного конца, с установленной в ней хромель-алюмелевой термопарой. Горячий спай термопары помещается вблизи закрытого конца зонда [1].

Для определения зависимости интенсивности шлакования от температуры газов взвешиваются отложения, снятые с участка зонда длиной 250 мм. В результате пробного сжигания каменного угля марки ДГ «Котинское» на котле БКЗ-210-140Ф Кировской ТЭЦ-4 при номинальных нагрузках удалось установить образование рыхлых отложений на заднем скате холодной воронки. Также следует отметить, что при температуре газов  $t_r = 1100\text{--}1170^\circ\text{C}$  отложения с зондов были рыхлые, легко растирались пальцами и с увеличением температуры  $t_r \geq 1200^\circ\text{C}$  отложения упрочнялись.

Во время опытов по определению  $t_{\text{нш}}$  нагрузка котла составляла 180–220 т/ч, условия проведения замеров представлены в таблице. Длительность выдержки зондов в топке составляла 15–20 минут. По результатам опытов на рис. 2 представлена зависимость интенсивности роста отложений от температуры топочных газов. Для сравнения представлен темп шлакования высокозольного бородинского угля, сжигавшегося на Кировской ТЭЦ-4 в 2011 году.

Условия проведения опытов для исследования шлакования  
топки при сжигании непроектного котинского угля

№ опыта	Нагрузка котла, $D_{\text{пр}}$ , т/ч	Коэффициент избытка воздуха, $b''_{\text{пп}}$	Зольность, $A_d$ , %	Продолжительность опыта $\phi$ , ч	$t_{\text{газов}}$ , °C	$g$ , кг/м <sup>2</sup> ·ч
1	189	1,42	12,1	0,25	1290	40,1
2	204	1,42	12,1	0,33	1265	31,3
3	189	1,45	12,8	0,5	1070	0,0

Из рис. 2 видно, что температура начала шлакования «котинского» угля составляет  $t_{\text{нш}}=1070$  °C, а высокозольного бородинского угля –  $t_{\text{нш}}=980$  °C. Таким образом, определенная экспериментальным путем температура начала шлакования угля марки ДГ ШУ «Котинское» на 90 °C выше аналогичной температуры шлакующегося бородинского угля. При температурах до 1070 °C отложения золы котинского угля на зонде практически отсутствуют.

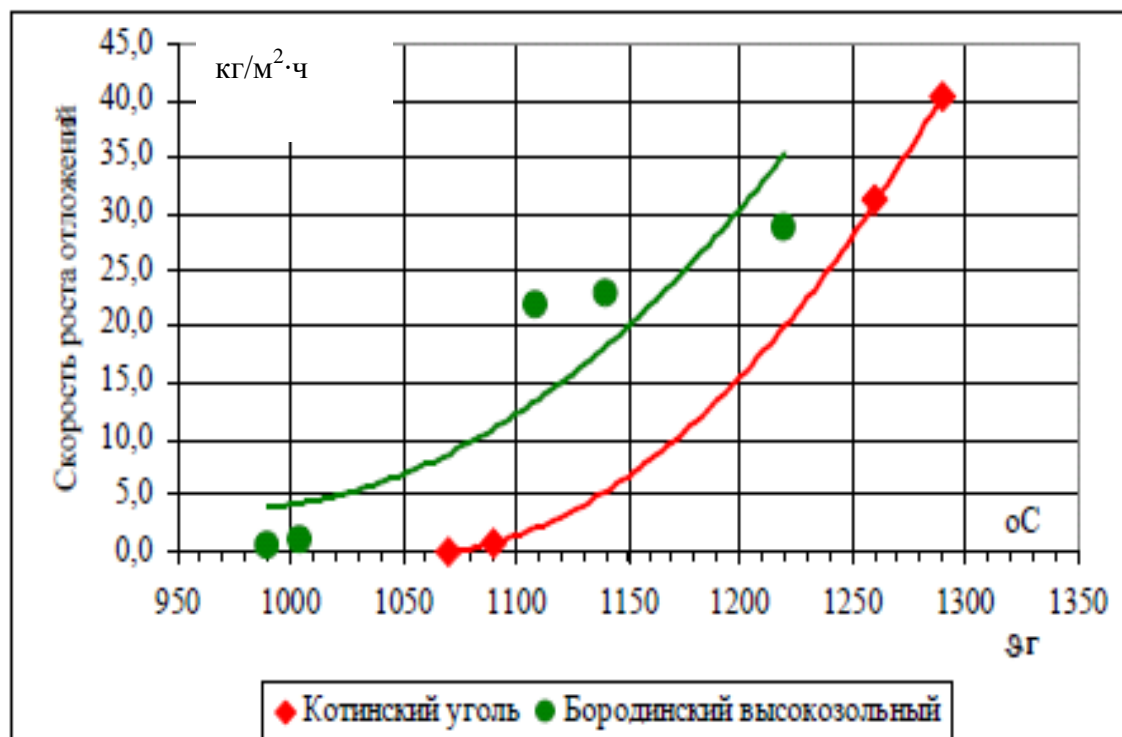


Рис. 2. Зависимость интенсивности роста отложений от температуры топочных газов

Следует отметить также, что при использовании пакетов прикладных программ есть возможность получить общую картину горения, поля изолиний и параметры аэродинамики горения, теплообмена, взаимодействия частиц с ограждающими поверхностями топочной камеры для различных способов организации факельного и низкотемпературно-вихревого сжигания твердого топлива. Совокупность этих результатов, дополняемая их интерпретацией в трехмерной визуализации, существенно расширяет возможности для выбора варианта перевода энергетического котла на непроектное топливо по сравнению с традиционными подходами к предконструкторской проработке такой инженерной задачи.

#### Список литературы

1. Методика определения шлакующих свойств твердых топлив в промышленных и стендовых условиях. МТ-34-70-84. М., 1983.
2. Алешинский Р. Е., Векслер Ф. М., Говсиевич Е. Р., Эдельман В. И. Качественные характеристики угольного топлива: их влияние на технико-экономические показатели ТЭС // Промышленная энергетика. 2003. № 1.
3. Гриценко М. В., Клер А. М., Степанова Е. Л. Комплексная методика определения затрат при использовании на ТЭС различных видов твердого топлива // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2007. № 4. С. 99–110.
4. Гаврилов А. Ф., Гаврилов Е. И. Экологические аспекты замещения экибастузского угля кузнецкими углями на ТЭС России // Теплоэнергетика. 2004. № 12. С. 23–28.

УДК 621.165.4

Лукина Ю. Н., Бирюзова Е. А.  
Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет  
Lukina-y@mail.ru, biryuzova@rambler.ru

### **ПРЕИМУЩЕСТВА ПАРОВИНТОВОЙ МАШИНЫ ПРИ УСТАНОВКЕ ЕЕ НА ПРЕДПРИЯТИИ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ ЖБК**

Энергетические исследования предприятия по производству ЖБК в поселке Толмачево Ленинградской области проводились в целях:

- оценки эффективности использования предприятием коммунального комплекса топливно-энергетических ресурсов (ТЭР);
- составления топливно-энергетического баланса предприятия;
- разработки мероприятий по повышению эффективности использования ТЭР;
- разработки обосновывающих материалов, представляемых собственником предприятия в Комитет по тарифам и ценовой политике Ленинградской области (ЛенРТК), для утверждения предприятию нормативов удельных расходов условного топлива на выработанную тепловую энергию, запасов топлива и технологических потерь при передаче тепловой энергии.

Объектами обследования являлись котельная, расположенная в поселке Толмачево Лужского района Ленинградской области, и тепловые сети предприятия, по которым осуществляется передача тепловой энергии потребителям.

Основными видами производственной деятельности предприятия в 2011 году были:

- производство ж/б конструкций – 8819 м<sup>3</sup>;
- производство металлических конструкций – 65 т;
- производство пара и горячей воды котельной – 40,6 тыс. Гкал.

По результатам экспертизы в качестве рекомендации было предложено установить на производстве паровинтовую машину (ПВМ).

Внедрение паровинтовой машины повышает качество использования избыточной энергии.

Ожидаемый энергетический эффект:

- 1) в натуральном выражении – 2000 тыс. кВт·ч/год;
- 2) в денежном выражении – 3960 тыс. руб.

Необходимые затраты – 30000 тыс. руб.

Срок окупаемости – 4,3 года.

1. Технические преимущества ПВМ:

- высокий КПД расширения (0,7–0,75) в широком диапазоне режимов (конденсат, образующийся при расширении пара, затекает в зазоры между рабочими органами, уменьшая утечки пара и повышая КПД);
- простота конструкции, высокая ремонтопригодность, относительно небольшие затраты на производство двигателя;
- высокий межремонтный ресурс (15 тыс. ч) обусловлен отсутствием взаимного касания роторов и соответственно отсутствием механического износа;
- ПВМ может работать на паре любой влажности. При малой скорости потока между винтами отсутствует эрозийный износ поверхностей рабочих органов;
- неприхотливость к качеству пара, наличию в нем частиц грязи;
- высокая маневренность при изменении режима работы, быстрый пуск и остановка;
- высокая эксплуатационная надежность и безопасность при возникновении аварийной ситуации.

2. Потребительские качества ПВМ:

Конструкция ПВМ позволяет в широком диапазоне приспосабливаться к конкретным условиям и, как следствие, может покрывать весь наиболее часто встречающийся диапазон мощности от 200 до 1500 кВт. Данное обстоятельство значительно расширяет область применения ПВМ.

Энергоустановка с ПВМ может быть трех типов:

- для автономного режима;
- для режима, параллельно сети (режим энергосбережения);
- для непосредственного привода агрегатов собственных нужд в котельной, например, водяных насосов.

При работе в режиме энергосбережения энергоустановка работает на сеть предприятия, покрывая часть его собственных нужд в электроэнергии и уменьшая тем самым ее потребление из сети. Обороты энергоустановки определяются частотой переменного тока в сети. Мощность установки определяется перепадом давления и расходом пара через машину и регулируется дроссельным клапаном на входе в ПВМ.

Система автоматического управления и защиты ПВМ, основанная на микропроцессорной технике, должна учитывать различный технический уровень приборного оснащения котельных, допускать возможность работы совместно с современными АСУ ТП на базе персональных компьютеров, а также работать автономно в котельной с морально устаревшими КИП.

При разработке конструкции ПВМ большое значение придается ее ремонтпригодности. Ремонт производится обычно через 1,5–2 года и заключается в перезаливке баббитом подшипников скольжения, а также в полировке или замене уплотнительных колец торцовых уплотнений. Обычно на переборку ПВМ уходит 4–5 дней работы двух слесарей средней квалификации.

### 3. Особенности эксплуатации энергоустановки:

ПВМ рассчитана на достаточно низкий уровень технического обслуживания, поскольку эксплуатация ее проводится персоналом котельной.

Паровинтовая машина полностью автоматизирована и имеется возможность диспетчеризации ее работы.

Персонал работает в дневную смену. Круглосуточный контроль работы энергоустановки осуществляется с монитора компьютера, который находится на пульте управления котельной. Постоянного контроля работы установки со стороны дежурных операторов не требуется.

### 4. Система выдачи электрической мощности энергоустановки для режима энергосбережения:

При работе параллельно с электрической сетью 0,4; 6; 10 кВ целесообразно использовать асинхронный генератор (АГ), который фактически является обычным серийным асинхронным двигателем с короткозамкнутой обмоткой ротора.

Асинхронная машина – электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не равна (в двигательном режиме меньше) частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора.

### 5. Экономическая эффективность энергоустановки с ПВМ:

Паросиловое электрогенерирующее оборудование эффективно и быстро окупается вследствие:

1. Высоких цен на электроэнергию. Собственное производство электроэнергии в котельной приводит к некоторому увеличению расхода топлива, однако это окупается низкой стоимостью получаемой электроэнергии, обычно в 4–5 раз дешевле, чем из сети.

2. Вероятности отключения электроснабжения, особенно для предприятий низкой категории. Этот фактор часто значит не меньше (а во многих случаях и больше), чем экономия затрат на оплату электроэнергии.



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕДНЫХ ГАЗОВ В ПГУ С ВЦГ

Перспективными способами повышения КПД ПГУ с внутрицикловой газификацией (ВЦГ) являются увеличение температуры рабочего тела перед газовой турбиной (ГТ), воздушная конверсия и использование горячей газоочистки. В настоящее время идут интенсивные разработки ведущих производителей ГТУ (*Mitsubishi* и другие), направленные на повышение температуры перед ГТ до 1500–1700 °С, в т.ч. при работе на синтез-газе воздушной конверсии, осуществляемой как в независимых промышленных установках (коксоδοменное и конвертерное производство), так и в системах с ВЦГ.

Рассматривается способ сжигания бедного синтез-газа с пониженной температурой горения в высоконагретом цикловом воздухе, обеспечивающий подавление оксидов азота при росте эффективности комбинированного цикла с повышением начальной температуры до 1500–1700 °С.

В разрабатываемом варианте появляется возможность использования в качестве топлива низкокалорийных газов с  $Q_i^d = 1,5\text{--}5$  МДж/кг при сохранении остальных параметров ( $\text{CH}_4 < 1\%$  и  $\text{NH}_3 < 1000$  млн<sup>-1</sup>), но без использования пилотного топлива, форкамер и с максимальной температурой газов перед турбиной  $t_T$  до 1700 °С.

Модернизация технологии связана с использованием высоконагретого (800–1000 °С) циклового воздуха.

Было выполнено 15 поисковых исследований в программном пакете «Ansys», направленных на определение характеристик камеры сгорания, приводящих к получению оптимальных целевых параметров.

Расчет проведен для схем ПГУ на перспективные и достигнутые параметры.

Рассмотрены различные конфигурации камеры сгорания, способы подвода воздуха и топлива, углы крутки потоков. Моделировалась щелевая подача газа и первичного воздуха в торцевую часть кольцевой камеры сгорания; коллекторная подача первичного воздуха в поток синтез-газа, коллекторная подача синтез-газа в поток первичного воздуха. Подача вторичного воздуха осуществлялась во всех вариантах через наружную стенку камеры.

Выполненные поисковые исследования показали возможность сжигания синтез-газа в высоконагретом воздухе по двухступенчатой схеме и получения нормативных показателей на выходе из камеры сгорания за счет изменения конструктивных и режимных факторов камеры сгорания.

В результате моделирования в среде «Ansys» получена оптимальная компоновка раздаточной системы, которая обеспечивает неравномерность распре-

деления температур по выходному сечению камеры сгорания, близкую к необходимому – 12,4 %, низкие выбросы  $\text{NO}_x$  – 23 млн<sup>-1</sup>, приемлемую радиальную неравномерность температур – максимумы температур в прикорневой зоне и в верхней части лопаток первой ступени газовой турбины не наблюдаются.

В случае универсальной ПГУ с горячей сухой газоочисткой, при которой с топливом в камеру сгорания поступает аммиак, для подавления образования топливных оксидов азота необходимо применение двухступенчатой схемы сжигания.

Предложенное решение в сочетании с известными методами создаст реальную основу энергетического использования бедных газов различной природы с отказом от специальных устройств стабилизации пламени (форкамер), кинетических схем горения и с обеспечением экологичности сжигания. Перераспределение тепловой нагрузки с синтез-газа на дополнительно подогреваемый воздух явится эффективным способом снижения ограничений по количеству воздуха на охлаждение жаровой трубы и разбавление продуктов сгорания. По оценкам, выполненным в рамках НИР, воздуха будет достаточно для охлаждения газов перед ГТ до температуры 1700 °С.

УДК 697.34

Михайлов Н. Г., Грицук С. А.  
Уральский федеральный университет,  
mikhn@inbox1.ru

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Проведение энергетических обследований систем теплоснабжения должно быть обязательной частью работ в области энергосбережения. Обследованиям подлежат источники тепла и воды, трубопроводные сети, потребители (жилые здания и сооружения). При проведении энергоаудита систем теплоснабжения города, района выясняются:

- структура построения системы, организационная структура, тип системы (открытая, закрытая);
- источники тепла (марки и количество котлов, их состояние, балансовая принадлежность источников, температурный график и график расхода теплоносителя, режимы эксплуатации, способ регулирования системы отопления в зависимости от температуры окружающей среды, способ и характеристики водоподготовки);
- общая тепловая нагрузка на отопление, горячее водоснабжение и вентиляцию, климатические характеристики и расчетная температура;
- тепловые сети (схемы теплотрасс, обеспеченность требуемых напоров у потребителя, состояние трубопроводов и их теплоизоляционных и антикоррозионных покрытий, наличие гидроизоляции, потери теплоносителя, аварий-

ность на 1 км тепловых сетей, сравнение нормативных и фактических теплопотерь);

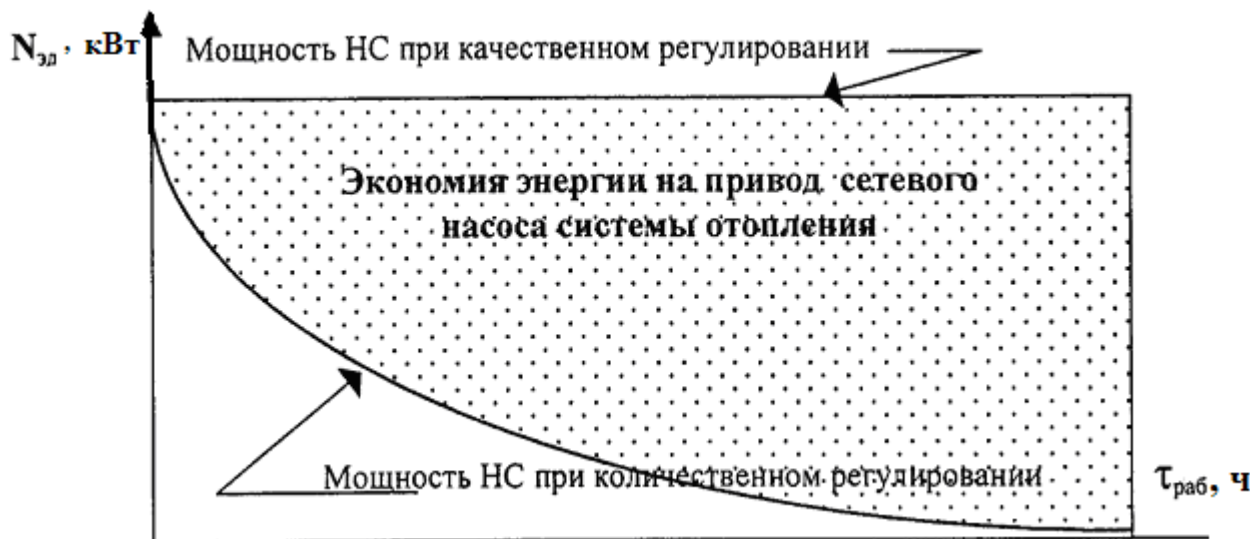
- схема теплоснабжения с указанием распределения потоков энергоресурсов, районов с дефицитом обеспеченности энергоресурсами;
- размещение, состояние и характеристики тепловых пунктов и насосных станций (типы водоподогревателей, наличие и характеристики отложений в них, оснащённость тепловых пунктов средствами борьбы с отложениями, оснащённость контрольно-измерительными приборами, средствами учета расхода энергоресурсов, наличие автоматических систем регулирования);
- распределение тепла по группам потребителей (население, бюджетная сфера, промышленность, сфера обслуживания);
- состояние диспетчеризации и автоматизации систем сбора информации;
- общие характеристики теплопотребления жилищного фонда и общественных зданий, расчетные и фактические нагрузки, обеспеченность энергоресурсами;
- характеристики и состояние внутридомовых инженерных сетей, оснащённости их средствами автоматического регулирования и учета потребления энергоресурсов, тип и состояние отопительных приборов, наличие отложений, качество обслуживания потребителей, качество работы систем, состояние диспетчеризации, организационная структура управления, соотношение нормативного и фактического потребления.

Тепловая энергия, получаемая коммунальными службами с различными энергоносителями (газ, топливо, водяной пар, горячая вода и др.), используется для обеспечения потребностей на отопление и вентиляцию; горячее водоснабжение; собственные нужды. Наиболее распространенными теплоносителями являются водяной пар и горячая вода с температурой до 150 °С, производимые в котельной и по трубопроводам направляемые к потребителям.

Регулирование отопления в основном осуществляется по температуре при постоянном расходе теплоносителя. Во многих случаях расход воды в системе отопления регулируется дважды в год в начале и конце отопительного периода. Расход воды по сети летом составляет около 80 % от зимнего расхода. Обычно температура воды в прямой линии колеблется от 70 до 150 °С, в обратной линии в основном находится в пределах 42–70 °С.

Системы отопления, работающие при постоянном расходе и регулировании температурой теплоносителя (качественное регулирование), имеют недостатки по сравнению с системой регулирования подачей воды (количественное регулирование). Система инерционна, изменение температуры в системе затягивается на несколько часов. Система имеет большое значение постоянной времени переходных процессов, плохо отслеживает потребности в тепле на отопление при резких колебаниях наружной температуры воздуха, которое иногда бывает более десяти градусов за сутки. Температура иногда регулируется только несколько раз в сутки. Особенно большая проблема в обеспечении экономичных режимов больших городов, тепловые сети которых характеризуются большой протяженностью и инерционностью.

При регулировании системы теплоснабжения подачей количества сетевой воды, нагретой до заданной постоянной температуры, мощность насосного агрегата пропорциональна расходу горячей воды в системе в третьей степени (для турбулентного режима) и график зависимости мощности насоса во времени отопительного сезона напоминает отопительный график. Площадь под графиком  $Q-H$  равна энергии, затраченной на прокачку теплоносителя, которая меньше, чем в первом случае (рисунок).



Экономия энергии циркуляционного насоса при переходе на количественное регулирование системы теплоснабжения

При создании и реконструкции систем отопления нужно шире внедрять количественные методы регулирования систем. Переход к системе отопления с регулированием по расходу воды в системе позволяет достичь 60 % экономии электроэнергии на привод циркуляционных сетевых насосов. Кроме того, замена элеваторных узлов экономичными маломощными циркуляционными насосами с системой автоматического регулирования отопления дополнительно экономит энергию циркуляционных насосов.

При обследовании теплотрасс проверяются следующие возможные причины потери энергии:

- наличие плохого качества тепловой изоляции (устанавливается по фактическим тепловым потерям на основе расхода воды и падения температуры);
- наличие утечек воды в теплотрассе (определяются по расходу подпиточной воды либо по балансу расхода воды в прямой и обратной трубах). Для выявления мест утечек в подземных теплотрассах используются акустические течеискатели, в том числе корреляционные течеискатели, указывающие расположение мест утечек между двумя датчиками, размещаемыми на исследуемом участке;
- подтопление теплотрасс с плохой гидроизоляцией. Особенно велики нерасчетные тепловые потери в тепловых сетях с подземной прокладкой трубо-

проводов и высоким уровнем грунтовых вод при затоплении их дождевыми или паводковыми водами. При таком нарушении тепловой изоляции труб теплопотери в тепловых сетях достигают 50 % и более. Потери тепла устраняются либо надземной прокладкой теплотрасс, либо применением предварительно изолированных труб, например, с изоляцией из пенополиуретана. Наличие датчиков нарушения гидроизоляции предварительно изолированных труб позволяет своевременно определять их повреждения.

Определение потерь тепла в теплотрассах проводится по результатам приборного обследования и выполненных тепловых расчетов. Для оценки состояния теплотрасс необходимо сравнить потери в них теплоты с теми значениями, которые допускались при проектировании в соответствии с требованиями СНиП. Эти данные можно использовать для оценки эффективности рекомендаций по улучшению теплоизоляции труб систем теплоснабжения.

УДК 697.1

Михалап М. А., Толстова Ю. И.  
Уральский федеральный университет,  
y.tolstova@mail.ru

## **ОТОПЛЕНИЕ ПОМЕЩЕНИЯ ЛЕДОВОЙ АРЕНЫ ХОККЕЙНОГО КОРТА В Г. СУРГУТ**

В настоящее время активно развивается строительство объектов спортивного назначения, в числе которых крытые сооружения с ледовым покрытием. Особенностью их являются значительные теплопотери из-за наличия обширной открытой поверхности льда. В связи с этим требуется отопление во все периоды года. Параметры воздуха и режимы использования сооружений приведены в нормативных документах [1].

Как правило, применяются комбинированные системы отопления:

- дежурное отопление местными нагревательными приборами, рассчитанное на поддержание температуры  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в холодный период года;
- дополнительное отопление, рассчитанное на догрев воздуха помещения до требуемых температур.

Система дежурного отопления – горизонтальная двухтрубная с нижней разводкой магистралей вследствие протяженности помещения. Прокладка магистралей и установка нагревательных приборов предусматривается под трибунами в недоступной для посетителей зоне. В качестве отопительных приборов дежурного отопления выбраны регистры из гладких труб.

Дополнительное отопление может осуществляться приточными системами за счёт перегрева приточного воздуха, а также системами электрического отопления с применением инфракрасных излучателей или электроконвекторов. В переходный и теплый периоды года системы теплоснабжения переходят на

режим обеспечения горячего водоснабжения. Тогда дополнительное отопление возможно только системами электрического отопления.

Для отопления помещения ледовой арены в переходный и теплый период года, когда наблюдаются значительные теплонедостатки за счёт теплопоглощения поверхностью льда, была рассмотрена возможность применения электрических инфракрасных излучателей фирмы FRICO (1-й вариант) либо электроконвекторов фирмы FLOWAIR (2-й вариант).

Проектирование систем инфракрасного (лучистого) отопления, выбор количества и размещения излучателей производится из условия обеспечения нормируемой плотности теплового потока на уровне головы человека. Согласно [2], эта величина составляет  $35 \text{ Вт/м}^2$ .

При расчёте систем с электроконвекторами определяющими показателями являются параметры приточной струи на уровне рабочей (обслуживаемой) зоны: скорость не более  $0,3 \text{ м/с}$ ; избыточная температура не более  $3^\circ\text{C}$  [2].

После выполнения необходимых расчётов по методике, изложенной в [3; 4] были получены следующие результаты для тепловой мощности системы дополнительного отопления в переходный период года  $300 \text{ кВт}$ :

- по 1-му варианту необходимо установить 50 излучателей фирмы FRICO типа IR-6 с размещением вдоль наружных стен на высоте  $7,5 \text{ м}$  от пола;
- по 2-му варианту необходимо установить 10 электроконвекторов LEO EL фирмы FLOWAIR на высоте  $7,5 \text{ м}$  от пола.

Электрическое отопление необходимо в помещении ледовой арены в переходный период (30 сут.) и теплый период года (61 сут.). Принимается, что за это время будет 15 соревнований (3 ч каждое), тренировки ежедневно (9–12 ч), ночной режим ежедневно (12 ч). Необходимая мощность системы электрического отопления по режимам и периодам года представлена в табл. 1.

Таблица 1

Потребление электроэнергии оборудованием

Период года	Режим работы	Мощность системы лучистого отопления (1-й вариант), кВт	Мощность системы отопления электроконвекторами (2-й вариант), кВт	Продолжительность использования мощности, ч/год
Переходный	Режим тренировок	230	345	345
	Режим соревнований	295	410	15
	Ночной режим	170	280	360
Теплый	Режим тренировок	188	303	702
	Режим соревнований	150	265	30
	Ночной режим	169	284	732

Выбор варианта произведён на основании технико-экономического расчёта. Для выявления более целесообразного варианта были подсчитаны капитальные, эксплуатационные и приведённые затраты (см. табл. 2).

Результаты расчётов показали, что капитальные затраты на систему лучистого отопления (1-й вариант) выше, чем для системы отопления электроконвекторами (2-й вариант). Однако по эксплуатационным расходам и приведённым затратам эта система имеет преимущества. Годовой экономический эффект составляет 451 тыс. руб./год, срок окупаемости 1,62 года.

Таким образом, показано преимущество системы лучистого отопления в переходный и тёплый периоды года. Кроме того, она может использоваться при различных технологических мероприятиях (заливка и обработка льда) в течение всего года. Управление и регулирование работы осуществляется с помощью автоматизированных систем энергоснабжения.

Таблица 2

Результаты сравнения вариантов

№ п/п	Показатели	Варианты	
		1	2
1	Капитальные вложения, тыс. руб., всего в т.ч.:	2780	2530
	материалы	458	410
	монтаж	2330	2120
2	Годовые эксплуатационные расходы, тыс. руб./год, всего в т.ч.:	1380	1860
	электроэнергия	620	1004
	оплата труда	312	312
	амортизация (5 %)	132	118
	прочие (30 %)	319	430
3	Приведенные затраты, тыс. руб./год	1720	2170
4	Условно-годовая экономия, тыс. руб./год	480	
5	Годовой экономический эффект, тыс. руб./год	451	

#### Список литературы

1. СП 31-112-2007. Физкультурно-спортивные залы. Ч. 3. Крытые ледовые арены. М. : ОАО Институт общественных зданий, 2008. 105 с.
2. СП 60.13330.2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. М. : Минрегион России, 2012. 80 с.
3. Шумилов Р. Н., Толстова Ю. И. Математическое моделирование теплового режима при лучистом отоплении // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции : материалы второй международной научно-технической конференции. М. : МГСУ, 2009. С. 130–132.
4. Шумилов Р. Н., Толстова Ю. И. Проектирование систем вентиляции и отопления : учебное пособие. В 2 ч. Екатеринбург : УГТУ, 2009. Ч. 1. 187 с.

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ УРАНА

Переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) является одной из важнейших задач современной радиохимической промышленности. На заводе РТ-1 ПО «Маяк» для переработки ОЯТ используются производственные цепочки, реализующие пюрекс-процесс [1] (англ. *PUREX – Plutonium Uranium Extraction*), в котором переработка ОЯТ осуществляется в плутониево-урановом экстракционном цикле. Товарным продуктом урановой ветви переработки ОЯТ является плав гексогидрата уранилнитрата, который получают упариванием азотнокислых растворов урана, поступающих с экстракционного цикла.

Качество и радиационная безопасность товарного продукта существенным образом зависят от равномерности распределения концентрации компонент в растворе, подающимся на упаривание. Подготовка раствора к упариванию осуществляется с помощью струйного перемешивания в емкостях с рабочим объемом 256 м<sup>3</sup> (рис. 1).

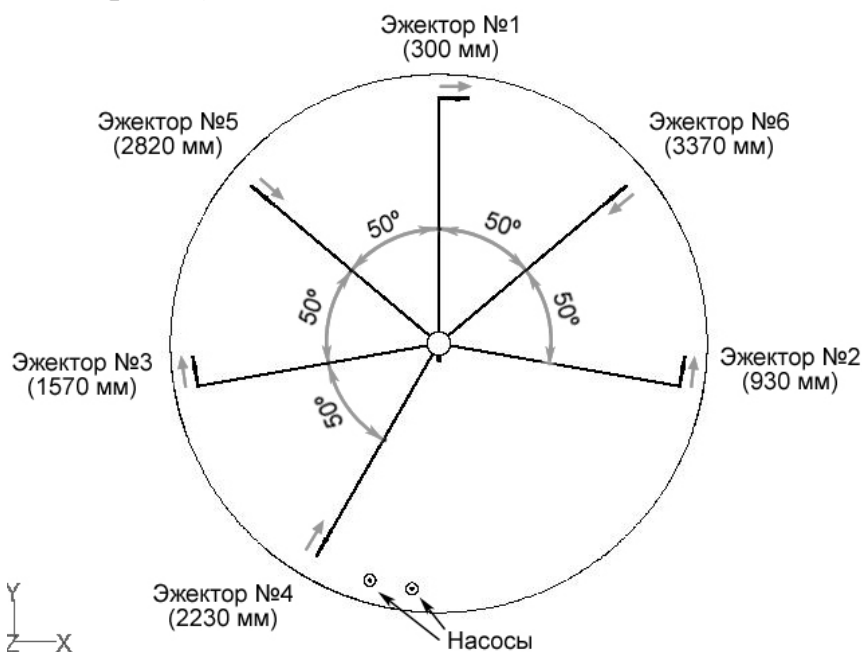


Рис. 1. Схема расположения эжекторов системы струйного перемешивания.

Стрелками показаны направления формируемые эжекторами струй, в скобках указаны уровни осей выходных патрубков эжекторов относительно дна емкостей

Продолжительность перемешивания при подготовке растворов к упариванию на РТ-1 составляет до 30 часов и более. При этом качество усреднения



физико-химических свойств после перемешивания часто не в полной мере удовлетворяет требованиям последующего технологического передела. Причиной этого может являться наличие застойных зон в емкостях.

Исследование гидродинамики перемешивания классическими инженерными методами затруднительно по причине низкой масштабируемости процессов перемешивания, большого объема емкостей и радиоактивности технологических растворов. В связи с этим, исследования производились с помощью методов и средств вычислительной гидродинамики.

Разработана физико-математическая модель, основанная на уравнениях Навье-Стокса в многофазной постановке с осреднением гидродинамических параметров по объемным долям фаз (*mixture model* [2]), стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентных пульсаций [3] и неявных моделях погружных насосов [4]. Выполнена проверка адекватности разработанной физико-математической модели методом натурного эксперимента [4]. Установлено, что ошибка моделирования составляет не более 12 %.

Установлено, что между эжекторами № 2 и 4 (рис. 1) расположена застойная зона, в вертикальном направлении распространяющаяся на всю высоту емкости, и занимающая до трети площади радиального сечения емкости на различных уровнях от дна, после 30 ч перемешивания неусредненность контрольного компонента в емкости составляет 15 %. Кроме того, установлено, что гидравлическое сопротивление существующих эжекторов составляет 686 кПа, при этом гидравлическое сопротивление коллекторов и подводящих трубопроводов эжекторов составляет 246 кПа. Высокое гидравлическое сопротивление эжекторов обусловлено зауженностью проходных сечений их камер смешения.

В результате анализа результатов численного моделирования отмечены некоторые пути повышения эффективности перемешивания в емкостях, связанные с интенсификацией струйного перемешивания в емкости и организацией в емкости дополнительного механического перемешивания.

Установлено, что увеличение проходных диаметров камеры смешения эжекторов приводит к снижению гидравлического сопротивления до 219 кПа. Снижение гидравлического сопротивления эжекторов приводит к изменению рабочей точки насоса и увеличению подачи с 10 до 14 м<sup>3</sup>/ч. Показано, что установка двухъярусного осевого механического перемешивающего устройства в центре застойной зоны между эжекторами № 2 и 4 приводит к формированию в данной области устойчивого течения с восходящим потоком вдоль оси вала мешалки и нисходящим потоком за пределами зоны активного перемешивания.

В результате принятых мер через 15–20 ч перемешивания неусредненность объемной доли контрольного компонента в емкости составляет около 1 %. Через 30 ч перемешивания – около 0,5 % (рис. 2). Организация дополнительного механического перемешивания приводит к увеличению затрат электрической мощности на перемешивание на 2 кВт, однако, в результате общего сокращения продолжительности перемешивания и снижения гидравлического сопротивления эжекторов, удельные затраты электроэнергии на 1 м<sup>3</sup> технологического раствора сокращаются на 17 % – с 1,41 кВт·ч до 1,17 кВт·ч.

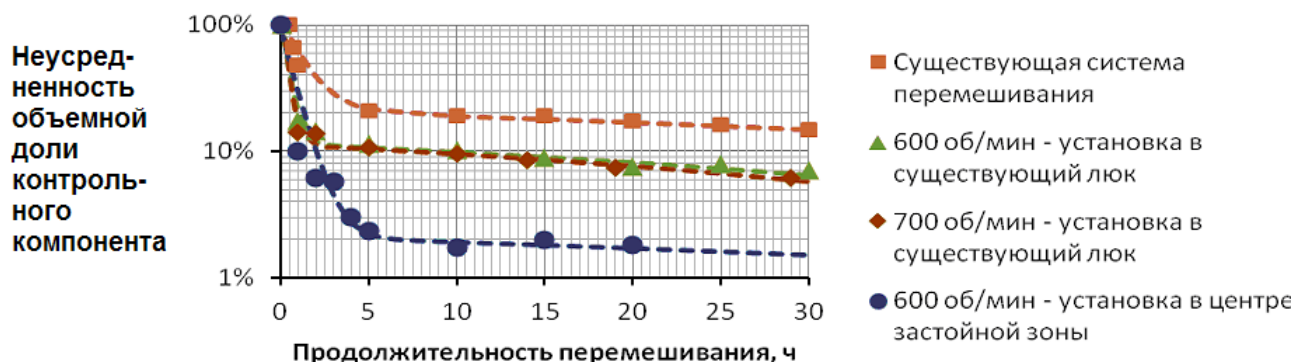


Рис. 2. Снижение неусредненности объемной доли контрольного компонента в емкостях с дополнительным механическим перемешиванием

#### Список литературы

1. Скачек М. А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС : учебное пособие для вузов / М. : ИД МЭИ, 2007. 448 с.
2. Manninen M., Taivassalo V. On the Mixture Model for Multiphase Flow / Espoo : Technical Research Center of Finland, VTT Publications, 1996. 67 p.
3. Авраменко М. И. О к-ε модели турбулентности / 2-е изд., перераб. и дополн. Снежинск : изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010. 102 с.
4. Морданов С. В., Хомяков А. П., Никулин В. А. Экспериментальная проверка адекватности численной модели струйного перемешивания // IV информационная школа молодого ученого : сб. научных трудов. Екатеринбург : УрО РАН, 2014. С. 242–252.

УДК 621.694.2

Мурманский И. Б., Аронсон К. Э.  
Уральский федеральный университет  
ilyam@gmail.ru

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ПАРОСТРУЙНЫХ ЭЖЕКТОРОВ ДЛЯ НОВЫХ ТУРБИН ПГУ

В последние годы развитие энергетической отрасли становится приоритетным направлением в России. Это связано с увеличением генерирующих тепловых и электрических мощностей, а также с необходимостью замены устаревшего оборудования электрических станций. Одновременно с ремонтом и заменой оборудования на существующих электростанциях происходит строительство новых электрических станций и ввод в эксплуатацию новых мощностей.

При проектировании новых паровых турбин перед заводами-изготовителями встает ряд вопросов по разработке нового вспомогательного оборудования. В частности, для паровых турбин мощностью до 80 МВт Уральского турбинного завода в составе ПГУ необходимы воздушные насосы (эжекторы), обеспечивающие функционирование конденсационных установок паровых турбин с минимальными затратами на собственные нужды. Существующие

эжекторы спроектированы для конденсаторов турбин мощностью более 100 МВт и характеризуются повышенными расходами рабочего пара на эжектор, высокой металлоемкостью и стоимостью [1].

Несмотря на внешнюю простоту устройства пароструйного эжектора, происходящие в нем термогазодинамические процессы сложны и не поддаются полному теоретическому описанию. В большом количестве как зарубежных, так и отечественных экспериментальных и теоретических работ [2-14], посвященных исследованию особенностей процессов в эжекторах, представлены различные методы расчета и конструирования пароструйных эжекторов. Однако надежные инженерные методики расчета этих устройств не доступны.

На рис. 1 показана схема работы струйного насоса. Рабочее тело (пар или вода) под давлением подается в приемную камеру 1, откуда через суживающееся сопло (или несколько сопел) с большой скоростью направляется в приемную камеру 2, соединенную с паровым пространством конденсатора патрубками отсоса паровоздушной смеси. Струя рабочего тела, благодаря понижению давления за соплом, увлекает за собой паровоздушную смесь из приёмной камеры в камеру смешения, состоящую из суживающейся (конфузорной) 3 и цилиндрической 4 частей канала, а также диффузора 5, в котором происходит преобразование кинетической энергии потока в потенциальную и повышение его давления [1].

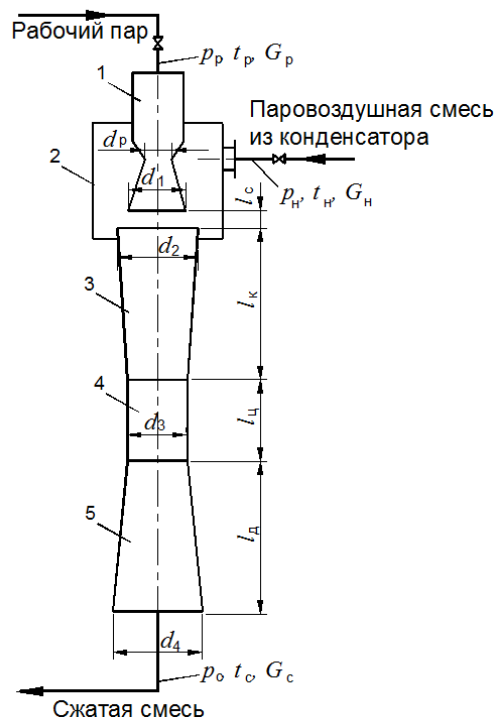


Рис. 1. Принципиальная схема эжектора

Характеристика пароструйного эжектора представляет собой зависимость давления всасывания  $p_n$  перед ступенью эжектора от расхода сухого воздуха  $D_{\text{возд}}$ .

На эффективность работы эжектора также существенное влияние оказывают параметры рабочего пара и эффективность работы промежуточных охладителей.

Для создания инженерной методики расчета эжекторов и разработки новых их конструкций был проведен анализ более 40 типоразмеров существующих эжекторов. Целью анализа являлось определение корреляционных связей основных геометрических характеристик эжектора с его производительностью. Установлено, что для 2 ступенчатых и 3 ступенчатых эжекторов разных заводов-изготовителей турбин такого рода связи отсутствуют. Это определяется различными подходами разработчиков оборудования к распределению степеней сжатия по ступеням эжектора.

При формулировке задания на проектирование эжектора принято, что пароструйный аппарат эжектора выполняется выносным.

На основании анализа методик расчета эжекторов выделено три группы методик: теоретические, полуэмпирические (учитывающие экспериментально полученные газодинамические характеристики) и эмпирические (основанные на экспериментальных данных). Обзор существующих методик расчета показал, что самой подходящей методикой является методика Московского энергетического института. Эта методика является одной из наиболее полных, результаты ее расчета совпадают с опытными данными.

В качестве основы для расчета приняты характеристики воздушных насосов и конденсационной установки турбины Уральского турбинного завода Т-63/76-8,8-УТЗ. Согласно данным о характеристиках турбины, работающей в схеме ПГУ-230, начальные параметры рабочего пара на эжектор следующие:  $P_p = 0,49$  МПа;  $T_p = 155$  °С. Расход основного конденсата, т. е. охлаждающей воды на эжектор от 50 до 120 т/ч в зависимости от режима работы турбины. Температура основного конденсата 40 °С.

При задании необходимого перечня исходных данных и выборе распределения степеней сжатия паровоздушной смеси по ступеням эжектора в результате расчетов определяются следующие геометрические характеристики пароструйного аппарата: диаметр критического сечения сопла –  $d_p$ ; выходной диаметр сопла –  $d_1$ ; диаметр цилиндрической части камеры смешения –  $d_3$ ; диаметр выходного сечения диффузора –  $d_4$ .

Для проверки новой методики поверочного расчета, позволяющей получить рабочую характеристику будущего эжектора, проведены испытания эжекторов в условиях эксплуатации на Южной ТЭЦ-22 в г. Санкт-Петербург, Московской ТЭЦ-23 и на Казанской ТЭЦ-2. Проведено сопоставление полученных данных с результатами поверочного расчета данного эжектора по разработанной методике.

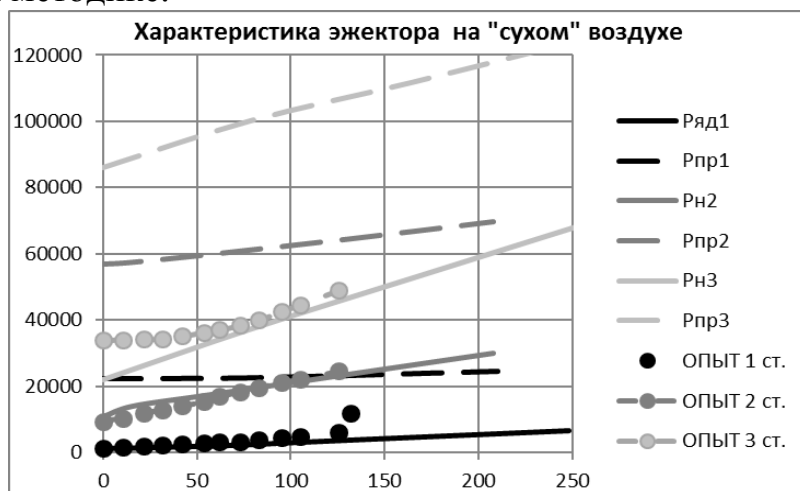


Рис. 2. Зависимость производительности эжектора от его основного параметра

Анализ и сравнение рабочих характеристик эжектора, полученных и рассчитанных согласно усовершенствованной методике, показывает, что они удовлетворительно согласуются, что позволяет использовать данную методику расчёта далее для разработки нового эжектора (рис. 2).

На основании конструкторского расчёта нового эжектора по заданным исходным данным получены геометрические размеры всех элементов пароструйного аппарата эжектора, а с использованием поверочной методики получена

рабочая характеристика будущего эжектора при температуре паровоздушной смеси  $t_{см} = 17,5^\circ\text{C}$  (рис. 3).

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для производства серии трехступенчатых эжекторов с выносными охладителями, максимальной производительностью 80 кг/ч, а также для расчета воздушных насосов с другими техническими характеристиками.

Исследования проводились в рамках выполнения НИОКР по Госзаданию «Повышение эффективности и надежности теплообменного оборудования энергопотребляющих и энергогенерирующих установок».

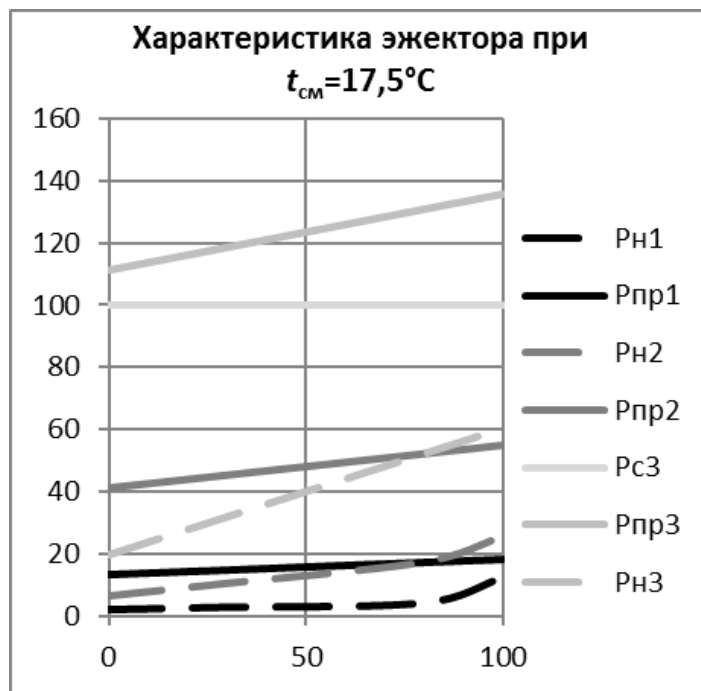


Рис. 3. Рабочая характеристика эжектора при  $t_{см} = 17,5^\circ\text{C}$

#### Список литературы

1. Мурманский И. Б., Аронсон К. Э. Исследование характеристик и разработка конструкций многоступенчатых пароструйных эжекторов // Сборник трудов конкурса научных работ студентов федеральных университетов. Казань, 2014.
2. Блюдов В. П. Конденсационные устройства паровых турбин // М.–Л. : Госэнергоиздат, 1951. 207 с.
3. Берман Л. Д., Зингер Н. М. Воздушные насосы конденсационных установок паровых турбин / М.–Л. : Госэнергоиздат, 1962. 96 с.
4. Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. М. : Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
5. Робожев А. В. Методика расчета многоступенчатых пароструйных эжекторов : учебное пособие для вузов. М. : МЭИ, 1965. 76 с.
6. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. М. : Энергия, 1974. 345 с.
7. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М. : Наука, 1991. 600 с.
8. Белевич А. И. Методические указания по расчету и проектированию пароструйных эжекторов конденсационных установок турбин ТЭС и АЭС / РД 34.30.105. М. : Минэнерго СССР, 1985. 53 с.
9. Шукин В. К., Колмогоров И. И. Газоструйные компрессоры. М. : Машгиз, 1963. 146 с.
10. Успенский В. А., Кузнецов Ю. М. Струйные вакуумные насосы. М. : Машиностроение, 1973. 144 с.
11. Цейтлин А. Б. Пароструйные вакуумные насосы. М.–Л. : Энергия, 1965. 400 с.
12. Шкловер Г. Г., Мильман О. О. Исследование и расчет конденсационных установок паровых турбин. М. : Энергоатомиздат, 1985. 240 с.
13. Расчет пароструйного эжектора ЭП-3-25/75. Черт. Б-800209. ЦКБ ХТЗ, 1960. 13 с.
14. Белевич А. И. РД 34.30.302-87 Методические указания по испытанию и эксплуатации пароструйных эжекторов конденсационных установок турбин ТЭС и АЭС. М. : Минэнерго СССР, 1990. 40 с.

## **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

На сегодняшний день ситуация в Республике Беларусь такова, что запасы собственных топливных ресурсов незначительны и страна находится в постоянной зависимости от внешних рынков. В связи с этим задача значительного сокращения энергопотребления страны путем внедрения энергосберегающих мероприятий крайне актуальна. Под пристальным вниманием находятся все отрасли экономики, ведется поиск путей выявления существенного потенциала энергосбережения.

В эту сферу попадает и легкая промышленность, имеющая важное значение для страны, так как она служит сырьевой базой для других отраслей и обеспечивает население непродовольственными товарами – ее доля составляет порядка 40 % в общем объеме товарооборота непродовольственных товаров, а также широко представлена в экспорте – более половины производимой продукции.

Более того, легкую промышленность Беларуси отличает от прочих отраслей также специфика сбыта продукции, обусловленная сезонными колебаниями, изменением спроса, что предполагает необходимость быстрой переориентации производства в соответствии с изменяющимся трендом спроса. Предприятия, изначально созданные в расчете на массовое производство, испытывают объективные трудности в решении соответствующих задач. Вместе с тем альтернативы нет в связи с жесткой конкуренцией на рынках сбыта, требованиями к качеству на рынках Европейского союза, номенклатуре продукции, ценовыми ограничениями. Последнее определяет чрезвычайную актуальность проблемы снижения затрат энергии при производстве продукции. Требуемое снижение энергетической составляющей в себестоимости можно обеспечить лишь при реализации концепции интенсивного энергосбережения, предписывающей системный подход к достижению цели и расширению энергосберегающей базы. Традиционный подход, основанный на локальном рассмотрении отдельных элементов, не в состоянии обеспечить требуемое снижение расходов на приобретение необходимых энергоресурсов.

Реализация системного подхода немыслима без достаточно глубокого понимания специфики конкретных теплотехнологических процессов и всего производства в целом, учет которых только и позволяет реализовать максимальный энергетический потенциал. Например, отделочные производства предприятий легкой промышленности имеют ряд специфических особенностей, связанных с

используемыми теплоносителями, большим набором операций и технологических аппаратов, значительными количествами образующихся побочных низкотемпературных тепловых потоков, средняя температура которых составляет порядка 55–60 °С. Эти потоки загрязнены механическими примесями, химическими красителями, что усугубляется объединением технологической и бытовой канализации. Наконец, стоки в ряде случаев имеют «залповый» режим сброса.

Температура тепловой обработки, согласно технологическим регламентам обработки и отделки ткани, не превышает 85 °С, в подавляющем числе случаев оставаясь на уровне 40–60 °С. Технологически допускается в большинстве случаев подача предварительно нагретой до 45 °С воды, а на линиях непрерывного действия – и до 85 °С, т. е. до температуры тепловой обработки. Организация 2-ступенчатого нагрева, использование абсорбционных тепловых насосов позволяет утилизировать тепловые побочные потоки, а также изменить структуру теплоносителей, что остро необходимо при переходе к собственной когенерации энергопотоков. В настоящее время традиционно используется пар в качестве теплоносителя, график потребления которого отличается крайней неравномерностью. И то, и другое затрудняет, а порой делает невозможным переход к энергетически и экономически выгодной собственной генерации вторичных энергоресурсов, без которой невозможно приблизиться к термодинамически идеальному производству.

На ткацких и прядильных производствах, в соответствии с технологическими регламентами, предполагается поддержание постоянного микроклимата в помещениях, без чего нельзя получить качественную продукцию, отвечающую требуемым характеристикам прочности, износостойкости, эластичности, устойчивости формы и пр., соответствующим мировым нормам и стандартам качества. Для обеспечения оптимальных параметров микроклимата требуется технологическое кондиционирование воздуха в указанных цехах, которое по объективным причинам прошлого энергетического благополучия базировалось на использовании компрессионных холодильных станций, потребляющих значительное количество электроэнергии. Сегодня такое решение приводит к росту себестоимости и потере конкурентоспособности продукции из-за ее высокой цены. Переход к абсорбционным холодильным станциям решает задачу комплексно: снижаются затраты на кондиционирование и создается тепловая нагрузка в межотопительный период, что позволяет получить для производства требуемый объем дешевой электроэнергии собственной когенерационной выработки.

Все обозначенные задачи решаются на основе апробированных, серийно выпускаемых устройств, аппаратов, установках. Для утилизации низкотемпературных тепловых потоков с температурой 12–45 °С промышленность предлагает абсорбционные тепловые насосы (АБТН), нагревающие поток сетевой воды до температуры 85 °С. АБТН позволяют снизить затраты теплоты теплогенерирующего источника на нагрев указанного теплоносителя не менее чем на 40 %. Дальнейшая утилизация теплоты сетевой воды связана с переходом к абсорбционным холодильным станциям систем кондиционирования, предварительно-

му нагреву технологической воды, традиционным обеспечением систем теплоснабжения и ГВС.

Обратимся к структуре энергопотребления текстильной отрасли. Статистика энергопотребления отрасли указывают на теплотехническую направленность использования ею энергоресурсов, поскольку до 70 % топлива расходуется в тепловой форме. С другой стороны, структура генерации потоков современных когенерационных комплексов на базе двигателей внутреннего сгорания отличается от указанной структуры потребления и, что является более существенным ограничением, от структуры теплоносителей. Добиться баланса потребления тепловых потоков и потоков электроэнергии, соответствия структур необходимо и возможно за счет применения тепловых аккумуляторов как водяных, так и паровых, утилизации сбросных потоков с применением буферных емкостей, самоочищающихся от отложений теплообменных аппаратов, обеспечивающих бесперебойную работу АБТН с равномерным графиком отпуска тепловой энергии.

В результате такого подхода общий потенциал собственной комбинированной генерации электроэнергии легкой промышленности Беларуси оценивается величиной до 60 МВт. Его реализация позволяет облегчить финансовое положение предприятий отрасли, а для страны обеспечит годовое снижение импорта природного газа на величину до 56 тыс. т у. т. Его реализация возможна при комплексном подходе к модернизации энергообеспечения, когда используется тригенерация и в состав теплоэнергетической системы предприятия интегрируется весь перечисленный выше набор оборудования, отсутствующий в комплексе на существующих производствах отрасли. Только системное, комплексное решение, расширение энергосберегающей базы, что и составляет сущность интенсивного энергосбережения, обеспечит требуемое снижение энергоемкости товарной продукции текстильной отрасли на величину не менее 20–30 %.

УДК 620.97

Николаев А. В., Мазанкина Д. В.  
Альметьевский государственный нефтяной институт  
teplotexAGNI@yandex.ru

## **ОТОПЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ОБОРУДОВАНИЕМ НА ОТРАБОТАННОМ МАСЛЕ И ПРИМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Особенности развития современных теплоэнергетических отраслей состоят в том, что, с одной стороны, истощаются ресурсы естественных энергоносителей, происходит удорожание их добычи и переработки.



В этой связи проблема рационального использования природных энергоносителей, а в равной степени, и проблемы энергосбережения становятся ключевыми вопросами современной экономики.

Этот вопрос крайне актуален и для юго-востока Татарстана с его развитой нефтяной инфраструктурой. Она включает в себя десятки НГДУ с большим количеством цехов, рабочих и производственных помещений, автопарков, насчитывающих более тысячи единиц различных видов техники. Одним из методов снижения затрат на производство тепловой энергии и пара может служить применение теплового оборудования, работающего на отработанном масле. Применение данного оборудования имеет ряд неоспоримых преимуществ.

- Экологичность. Как известно, существует проблема утилизации отработанного масла. Отличным выходом из данной ситуации является использование водогрейных котлов, которые работают с помощью отработанных горючесмазочных материалов (ГСМ). Это позволяет не только решить проблему утилизации, но и обеспечить тепловой энергией помещения различных зданий и сооружений. Окружающая среда не страдает от их применения, а значит – появляется возможность сохранить в первозданном виде природу для наших потомков.

- Окупаемость. Использование отработанных отходов позволяет вернуть в течение нескольких лет деньги, вложенные в приобретение котла. Данное обстоятельство делает покупку выгодной. Это особенно заметно, если речь идет об отоплении промышленных помещений. Такие условия предполагают более интенсивное использование котлов, что и приводит к возврату вложенных средств в максимально сжатые сроки. Кроме того, предприятия получают возможность утилизации отходов, что делает использование данного вида отопительных систем еще более выгодным.

- Автономность. Котлы отопления на отработанном масле имеют высокую степень автономности. Они применимы даже в тех условиях, которые не предполагают использование подобных систем.

- Безопасность. Современное производство котлов предполагает использование последних технологических веяний. Это позволяет создавать оборудование высокого качества, которое полностью безопасно для окружающих. Данный момент является весьма важным, поэтому находится под постоянным контролем производителей.

- Комфорт. Компании, выпускающие котельное оборудование, функционирующее на отработанных ГСМ, стремятся сделать его эксплуатацию максимально комфортной для потенциальных пользователей. В частности, можно не беспокоиться о неприятных запахах, с которыми может ассоциироваться применение подобного оборудования. Они полностью отсутствуют. Работа котла не становится причиной каких-либо неудобств.

Следовательно, данный вид оборудования целесообразно использовать для отопления и горячего водоснабжения гаражей и производственных помещений. В связи с этим предлагается применение такого вида оборудования, как:

- теплогенераторы на отработанном масле для системы воздушного отопления;

– водогрейные котлы на отработанном масле для получения горячей воды на бытовые и технологические нужды.

В свою очередь, для уменьшения расхода топлива и наиболее эффективного потребления тепловой энергии служат энергосберегающие технологии. К ним относятся энергосберегающие пленки для окон и терморегуляторы с датчиком температуры воздуха.

Энергосберегающие пленки для окон обеспечивают прохождение в комнату нужного количества света, но препятствуют выходу тепловой энергии из помещения. В зимнее время года энергосберегающие пленки могут сокращать потери тепла в помещении от 40 до 60 %, отражая тепло обратно в комнату, которое при обычном голом стекле беспрепятственно ушло бы наружу. А летом отражают энергию солнечных лучей обратно, сохраняя прохладу в помещении, и сокращают затраты на систему кондиционирования.

Терморегуляторы с датчиками температуры воздуха позволяют автоматически управлять отопительными приборами. В результате чего они работают не постоянно на полную мощность, а только тогда, когда это необходимо для поддержания заданной температуры.

Таким образом, индивидуальные системы теплоснабжения, функционирующие с помощью оборудования на отработанном масле и с применением современных энергосберегающих технологий, будут иметь ряд экологических и экономических преимуществ в сравнении с системами централизованного отопления.

УДК 621.311.22

Овечкин Д. Н., Суворов Д. М.  
Вятский государственный университет, г. Киров  
dmilar@mail.ru

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАТРАТ ТЕПЛОТЫ ПО ВИДАМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ НА ТЭС, ИМЕЮЩИХ ТУРБИНЫ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ**

Проблема поиска наиболее приемлемого метода распределения затрат теплоты и топлива на выработку электрической энергии и отпуск тепловой энергии при их комбинированном производстве на ТЭС, несмотря на очень большое количество различных методик [1, 2], актуальна и по сей день. Задачей настоящей работы является анализ и сравнение результатов расчетов по основным конкурирующим методикам величины удельного расхода теплоты на выработку электроэнергии для математической модели турбины с противодавлением, построенной на базе ее упрощенной тепловой схемы (см. рис. 1), при условии неизменности относительного внутреннего КПД проточной части.

Ввиду ограниченности объема публикации данные по соотношению удельных расходов по производству электрической энергии и по отпуску тепловой энергии [2; 3] в данной работе не приводятся. Кроме того, авторы пренебрегли потерями пара и теплоты в элементах схемы, не учитываются расходы пара и теплоты на собственные нужды паротурбинной установки. Система регенеративного подогрева питательной воды представлена одним подогревателем – деаэратором, работающим на скользящем давлении (близком к противодавлению турбины). Потерями давления в паропроводе от турбины до потребителя, невозвратом конденсата от потребителя, а также увеличением энтальпии жидкости при повышении давления насосами также пренебрегли.

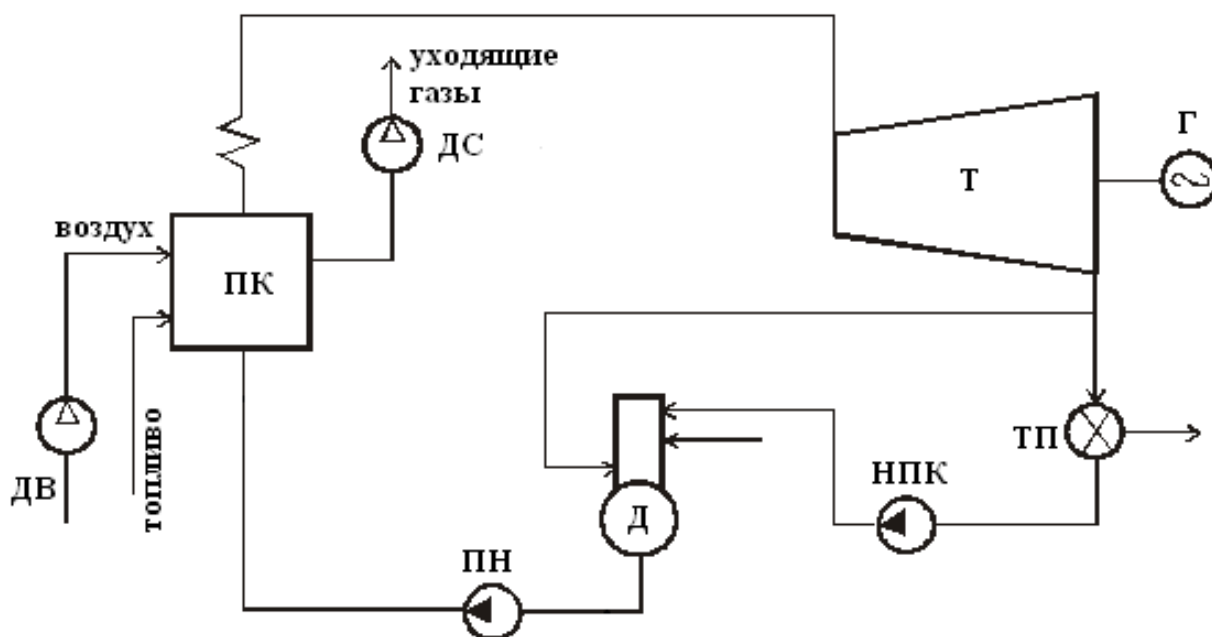


Рис. 1. Расчетная модель турбоустановки с противодавлением

Ранее аналогичные расчеты были выполнены в [2; 3] на основе методик, приведенных в [1] (кроме «термодинамического метода»).

Расчеты проводились с различными значениями начального давления пара и противодавления.

Для расчетов, как и в [2], были использованы следующие методы:

- 1) физический метод;
- 2) эксергетический метод;
- 3) нормативный метод (метод фирмы ОРГРЭС);
- 4) «термодинамический метод» Зайцева.

Достоинства и недостатки, а также аналитические зависимости методов подробно изложены в [1; 3] и в других публикациях.

На основании произведенных расчетов можно заключить, что для модельных граничных условий работы турбин с противодавлением применение термодинамического метода является возможным, хотя требуется его уточнение с целью учета параметров добавочной воды, компенсирующей невозврат конденсата технологического пара, и параметров самого этого конденсата (см. рис. 2).

В частности, рост удельного расхода теплоты при росте противодействия выше определенного значения при применении термодинамического метода обусловлен снижением температуры возвращаемого конденсата ниже температуры насыщения. Этот рост в данных условиях представляется неоправданным.

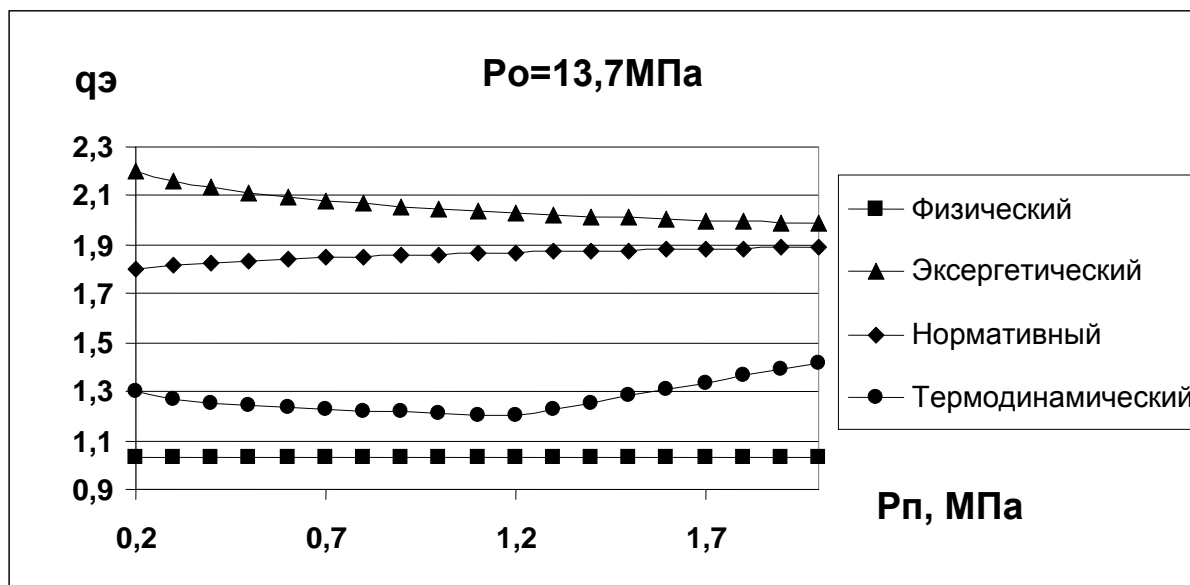


Рис. 2. Значения удельного расхода теплоты на выработку электроэнергии различными методами в зависимости от противодействия при начальном давлении пара 13,7 МПа

Также подтвержден ранее сделанный вывод [3] о том, что использование нормативного метода для турбин с противодействием, имеющих средние параметры свежего пара (3,5 МПа), является неприемлемым, поскольку в таком случае удельный расход теплоты на производство электроэнергии оказывается выше, чем по эксергетическому методу (см. рис. 3).

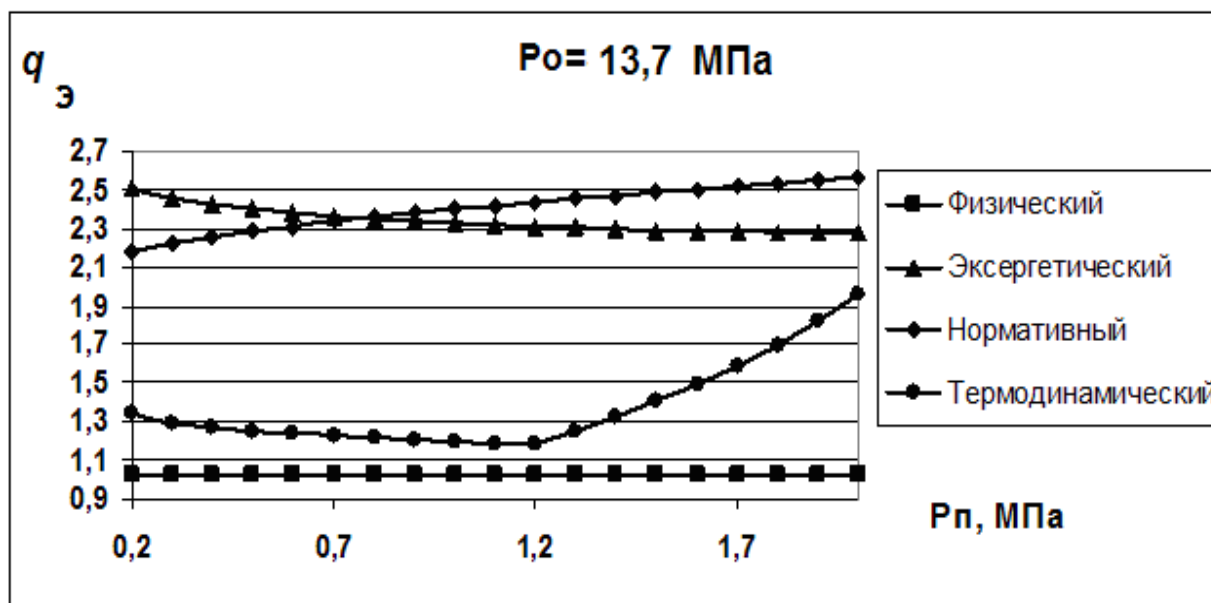


Рис. 3. Значения удельного расхода теплоты на выработку электроэнергии различными методами в зависимости от противодействия при начальном давлении пара 3,5 МПа

#### Список литературы

1. Киселев Г. П. Варианты расчета удельных показателей эффективности работы ТЭЦ: методическое пособие. М. : МЭИ, 2003. 32 с.
2. Горсткий Д. А., Суворов Д. М. О методах распределения затрат теплоты и топлива по видам энергетической продукции на ТЭЦ // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых 17-20 декабря 2013 г. Екатеринбург : УрФУ, 2013. С. 71–74.
3. Суворов Д.М. Анализ различных методов распределения затрат теплоты топлива при комбинированной выработке электрической и тепловой энергии // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2012: Материалы международной научно-практической конференции. Сборник научных трудов SWorld. Вып. 3. Т. 10. Одесса : Купrienko, 2012. С. 50–56.

УДК 621.311.22

Петракович М. А., Матвеев С. В., Картавец С. В.  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова  
petrakovichmariya@gmail.ru

### БЕСТОПЛИВНАЯ ПТУ НА ТЕПЛОТЕ ЖИДКОЙ СТАЛИ

В связи со значительным ростом выплавки стали в мире (в 2013 г. около 1,514 млрд т) [1] черная металлургия продолжает оставаться одной из масштабных отраслей промышленности. При этом свыше 30 % стали выплавляется в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). Так, для выплавки стали в ДСП на чистом ломе в реальных установках потребляется до 750 кВт·ч электроэнергии на каждую тонну. При этом вся эта электроэнергия или большая ее часть поступает от внешних источников генерации (ТЭС, ГРЭС, АЭС и т. д.) со значительными потерями в электросетях, что повышает ее стоимость. Так, многие металлургические предприятия вводят в эксплуатацию источники собственной генерации с потреблением дополнительного количества топлива.

В данной работе рассматривается возможность создания бестопливного источника генерации электроэнергии для ДСП.

Для решения поставленной задачи рассмотрим технологическую цепочку ДСП-машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) – прокатный стан с точки зрения количества и качества отведенной теплоты.

Так, при разливке и прокатке стали в окружающую среду, в связи с технологическими особенностями, отводится порядка 1190 МДж тепловой энергии с каждой тонны стали на температурном уровне, не превышающем 100 °С в окружающую среду в виде горячей воды, пара и воздуха. Использование этого низкопотенциального тепла для генерации электрической энергии практически невозможно из-за физической природы теплоносителей.

Частичным решением проблемы является замена воды и воздуха на другой теплоноситель, обладающий более широким интервалом рабочих темпера-

тур. В настоящее время в промышленности существует большое количество теплоносителей с разными физическими и химическими свойствами. Они могут быть как низкотемпературными, так и высокотемпературными. Существует решение по использованию высокотемпературных теплоносителей из класса жидкометаллических (ЖМТ) для разлики стали [2]. Жидкая сталь подается между слоями верхнего и нижнего теплоносителей, охлаждается, затвердевает, охлаждается до температуры горячей прокатки 1250 °С, прокатывается и охлаждается в зоне вторичного охлаждения (ЗВО) теплоносителем до температуры смотки готового листа в рулон (200 °С). Теплоносители, воспринявшие теплоту стали, направляются в теплообменные устройства для дальнейшего использования теплоты в зависимости от температурного уровня. Авторами разработаны три различных теплотехнических принципа организации теплообмена между жидкой сталью и теплоносителями, позволяющими получать различные температурные потенциалы воспринятой теплоты (см. таблицу).

Температурные потенциалы воспринятой теплоты

Вид теплотехнического принципа	Температура теплоносителя на входе в установку, °С	Температура теплоносителя на выходе из установки, °С
1 горизонтальный прямоток	150	200
2 горизонтальный противоток	200	1593
3 смешанный принцип	150	1500

Из таблицы можно сделать вывод, что были рассмотрены только температурные уровни нагревания теплоносителей до 200 °С и свыше 1500 °С. Стоит отметить, что в атомной энергетике ЖМТ применяются в основном для охлаждения ядерных реакторов с дальнейшей генерацией пара и электроэнергии. Так, в существующих энергоустановках АЭС ЖМТ работают в интервале температур от 300 до 600 °С. Тогда область температур свыше 200 и ниже 1500 °С, в рассмотренном решении для разлики стали между слоями ЖМТ, частично может быть заполнена областью температур, в которых работает современное оборудование АЭС для генерации пара и электрической энергии.

Это откроет возможности использования тепловой энергии стали в сталелитейном комплексе для генерации электроэнергии. Для осуществления предложенного мероприятия необходимо в существующих принципах организации теплообмена организовать работу теплоносителей в области температур, в которых работают существующие энергоустановки. Это обстоятельство позволяет с учетом КПД ПТУ 40 % получать до 140 кВт·ч электроэнергии с каждой тонны разливаемой стали. Полученную электроэнергию можно направить по регенеративному направлению в электросталеплавильный процесс: на дугу в ДСП.

#### Список литературы

1. World crude steel output increases by 3.5% in 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2014/World-crude-steel-output-increases-by-3-5--in-2013.html> (дата обращения: 22.10.2014).
2. Картавцев С. В. Интенсивное энергосбережение и технический прогресс черной металлургии. Магнитогорск : МГТУ, 2008. 312 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПГУ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Во всем мире прогресс в теплоэнергетике связывают с решением задач по повышению эффективности, экологичности, снижению материало- и капиталоемкости, повышению надежности и эксплуатационных свойств энергетических установок тепловых электростанций.

Одним из признанных направлений по реализации поставленных задач является широкое внедрение в энергетику комбинированных парогазовых установок. В энергетическом секторе, использующем в качестве топлива природный газ или жидкое топливо, приоритет использования парогазовых установок хорошо известен.

В 1944–1945 гг. в ЦКТИ А.Н. Ложкин разработал схему парогазовой установки со сгоранием топлива при постоянном давлении. Теоретические основы комбинированного парогазового цикла с высоконапорным парогенератором (ПГУ с ВПГ) были рассмотрены в работах ЦКТИ (А. Н. Ложкин, А. Э. Гельтман), что позволило повысить эффективность установки за счет параллельного с регенеративной системой паровых турбин подогрева питательной воды. В этот период были разработаны основные принципы комбинирования паровых и газовых турбин, проведен термодинамический анализ парогазовых циклов, выполнено сравнение различных комбинированных схем и выявлено преимущество установок с высоконапорными парогенераторами по сравнению с ПГУ сбросного типа (с низконапорными парогенераторами) и с котлами-утилизаторами. Это преимущество заключается прежде всего в значительном снижении металлозатрат в высоконапорные парогенераторы по сравнению с котлоагрегатами обычного типа. Кроме того, парогазовые установки с высоконапорными парогенераторами обеспечивают большую экономию топлива как по сравнению с парогазовыми установками других типов, так и по сравнению с отдельными паротурбинными и газотурбинными установками. Это справедливо для ПГУ на базе газовых турбин с начальной температурой газов перед ними до 950–1000 °С.

Принцип работы самой экономичной и распространенной классической схемы ПГУ таков. Устройство состоит из двух блоков: газотурбинной (ГТУ) и паросиловой (ПС) установок. В ГТУ вращение вала турбины обеспечивается образовавшимися в результате сжигания природного газа, мазута или солярки продуктами горения – газами. Образовавшиеся в камере сгорания газотурбинной установки продукты горения вращают ротор турбины, а та, в свою очередь, крутит вал первого генератора.

В первом, газотурбинном, цикле КПД редко превышает 38 %. Отработавшие в ГТУ, но все еще сохраняющие высокую температуру продукты горения поступают в так называемый котел-утилизатор. Там они нагревают пар до температуры и давления (500 °С и 80 атм), достаточных для работы паровой турбины, к которой подсоединен второй генератор. Во втором, паросиловом, цикле используется еще около 20 % энергии сгоревшего топлива. В сумме КПД всей установки оказывается около 58 %. Существуют и некоторые другие типы комбинированных ПГУ, но существенного влияния на современную энергетику они не оказывают. Как правило, такие системы используются генерирующими компаниями в случае, когда необходимо максимизировать производство электрической энергии. Когенерация в этом случае играет подчиненную роль и обеспечивается за счет отвода части тепла из паровой турбины. Паровые энергоблоки хорошо освоены. Они надежны и долговечны. Их единичная мощность достигает 800–1200 МВт, а коэффициент полезного действия (КПД), представляющий собой отношение произведенной электроэнергии к теплотворности использованного топлива, составляет до 40–41 %, а на наиболее совершенных электростанциях за рубежом – 45–48 %. Также уже длительное время в энергетике используются газотурбинные установки (ГТУ). Это двигатель совершенно иного типа. В ГТУ атмосферный воздух сжимается до 15–20 атм, в нем топливо сжигается с образованием высокотемпературных (1200–1500 °С) продуктов сгорания, которые расширяются в турбине до атмосферного давления. Вследствие более высокой температуры турбина развивает примерно вдвое большую мощность, чем необходимо для вращения компрессора. Избыток ее используется для привода электрического генератора. За рубежом эксплуатируются ГТУ единичной мощностью 260–280 МВт с КПД 36–38 %. Температура отработавших в них газов составляет 550–620 °С. Вследствие принципиальной простоты цикла и схемы стоимость газотурбинных установок существенно ниже, чем паровых. Они занимают меньше места, не нуждаются в охлаждении водой, быстро запускаются и изменяют режимы работы. ГТУ легче обслуживать и полностью автоматизировать.

Так как рабочей средой газовых турбин являются продукты сгорания, сохранять работоспособность деталей, которые омываются ими, можно, только используя чистые виды топлива: природный газ или жидкие дистилляты.

ГТУ быстро развиваются, при этом растет единичная мощность, происходит повышение рабочих параметров установки и КПД. За рубежом они освоены и эксплуатируются с такими же показателями надежности, как и паровые энергоблоки.

Разумеется, тепло отработавших в ГТУ газов может быть использовано. Проще всего это сделать путем подогрева воды для отопления или выработки технологического пара. Количество произведенного тепла оказывается несколько больше, чем количество электроэнергии, а общий коэффициент использования тепла топлива может достигать 85–90 %.

Есть и другая, еще более привлекательная, возможность заставить это тепло работать. Из термодинамики известно, что КПД наиболее совершенного цикла теплового двигателя (его придумал Карно почти 200 лет назад) пропор-



ционально отношению температур подвода и отвода тепла. В ГТУ подвод тепла происходит в процессе сгорания. Температура образующихся продуктов сгорания, которые являются рабочей средой турбин, не ограничивается стенкой (как в котле), через которую передается тепло, и может быть существенно выше. Освоено охлаждение омываемых горячими газами деталей, позволяющее поддерживать их температуры на допустимом уровне.

В паровых энергоустановках температура перегретого пара не может превышать допустимую для металла труб котельных пароперегревателей и таких неохлаждаемых узлов, как паропроводы, коллекторы, арматура, – она составляет сейчас 540–565 °С, а в самых современных установках – 600–620 °С. При этом отвод тепла в конденсаторах паровых турбин осуществляется циркуляционной водой при температурах, близких к температуре окружающей среды.

Указанные особенности позволяют существенно повысить КПД производства электроэнергии путем объединения в одной парогазовой установке (ПГУ) высокотемпературного подвода (в ГТУ) и низкотемпературного отвода тепла (в конденсаторе паровой турбины). Для этого отработавшие в турбине газы подаются в котел-утилизатор, где генерируется и перегревается пар, поступающий затем в паровую турбину. Приводимый турбиной электрический генератор при неизменном расходе топлива в камере сгорания ГТУ увеличивает выработку электроэнергии в 1,5 раза. В итоге КПД лучших современных ПГУ составляет 55–58 %. Такие ПГУ называют бинарными потому, что в них осуществляется двойной термодинамический цикл: пар в котле-утилизаторе и работа паровой турбины производятся за счет тепла, подведенного в камере сгорания ГТУ и уже отработавшего в верхнем газотурбинном цикле.

Привлекательными особенностями таких ПГУ, помимо высокого КПД, являются умеренная удельная стоимость (в 1,5–2 раза ниже, чем у паровых энергоблоков близкой мощности), возможность сооружения за короткое (два года) время, в два раза ниже потребности в охлаждающей воде, хорошая маневренность, сравнительная простота устройства и компактность.

Электростанции на базе парогазовых установок не только очень эффективны, но и отвечают самым жестким экологическим требованиям. Например, уровень выбросов оксидов азота такими электростанциями в 2–3 раза ниже, чем у более привычных нам газовых или дизельных. Именно поэтому около 65 % всех строящихся в мире электростанций комплектуются парогазовыми установками.

Согласно расчетам отечественных энергетиков постепенный перевод систем выработки электроэнергии на электростанции с парогазовыми установками позволит увеличить КПД энергооборудования более чем в два раза, что является немалым вкладом в обеспечение энергобезопасности страны. Кроме того, введение в строй большого количества подобных электростанций позволит значительно снизить конечную стоимость вырабатываемой энергии.

Парогазовые установки – относительно новый тип силовых установок используемый в западных странах чаще, особенно на электростанциях, работающих на природном газе.

## **ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ПРОЦЕССАХ СЖАТИЯ ВОЗДУХА В ОАО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ» Г. НОВОТРОИЦКА**

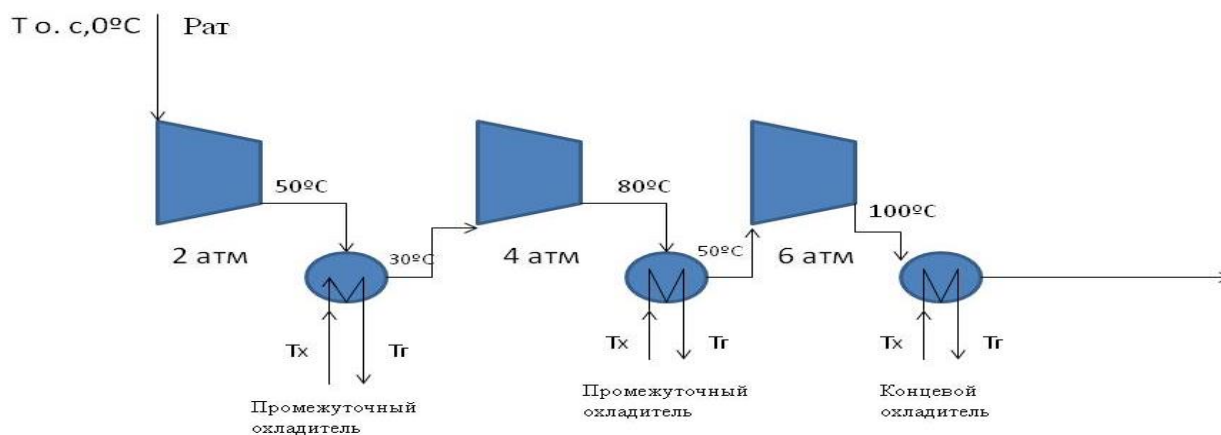
На сегодняшний день сжатый воздух является одним из важнейших ресурсов для большинства промышленных предприятий наряду с электроэнергией, газом и водой. Обеспечение бесперебойного производства сжатого воздуха становится необходимым условием исправного функционирования промышленных мощностей предприятия. Сжатый воздух очень широко используется в промышленности и в черной металлургии, в частности [1]; в металлургии: в доменном производстве и при производстве кислорода. Сжатый воздух производят при помощи трехступенчатого сжатия. Самое выгодное сжатие – изотермическое, при котором температура в ступени не меняется до перехода на следующую ступень. Требуемый на производстве сжатый воздух производится компрессорной установкой [2].

При сжатии воздуха выделяется тепло. Это тепло должно быть отведено из воздуха посредством воздушно- или водоохлаждаемых ребер охлаждения корпуса компрессора или с помощью дополнительного охладителя. Для достижения сжатого воздуха порядка 6 атм требуются промежуточные и конечной охладители. Если в охладителях используется вода, к примеру, из водоема, находящегося в непосредственной близости к предприятию, то в охладители она будет поступать с температурой окружающей среды, в связи с этим возникает проблема в охлаждении компрессора. Если использовать для охлаждения не воду, а антифризы, то этот метод может уменьшить затраты энергии для охладителя. Антифризы, такие как метиловый спирт, этиловый спирт, гидро-терм, Na–K, могут охлаждаться до минимальной температуры  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и при этом не изменяя своего жидкого агрегатного состояния, в то время как вода превращается в лед при минимальной температуре  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  [3].

Для того чтобы установка работала эффективно, воздух после выхода из одной ступени в другую надо охлаждать, обычно его охлаждают при помощи воды в промежуточных охладителях, но это иногда проблематично, так как вода не может охладить воздух до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  при своей минимальной температуре  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , но с этой задачей может справиться антифриз как зимой, так и летом.

Просчитаем работу сжатия в компрессоре с промежуточным водяным охлаждением и с охлаждением при помощи антифриза:

Для воды схема выглядит следующим образом.



Компрессорная установка с промежуточным водяным охлаждением

Для первой ступени:  $R = 286,689655 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $k = 1,4$ ;  $P_1 = 94 \text{ кПа}$ ;  $P_2 = 181 \text{ кПа}$ ;  $T_1 = 273 \text{ К}$ ;  $T_2 = 323 \text{ К}$ .

$$L_{1,\text{вода}} = \left( \frac{k}{k-1} \right) \cdot T_1 \cdot R \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \left( \frac{1,4}{1,4-1} \right) \cdot 273 \cdot 286,689655 \cdot \left[ \frac{181^{\frac{1,4-1}{1,4}}}{94} - 1 \right] = 56365 \text{ Дж}.$$

Подобным методом рассчитаем работу для 2 и 3 ступеней:

Для второй ступени:  $R = 286,689655 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $k = 1,4$ ;  $P_1 = 181 \text{ кПа}$ ;  $P_2 = 363,4 \text{ кПа}$ ;  $T_1 = 303 \text{ К}$ ;  $T_2 = 353 \text{ К}$ .

$$L_{2,\text{вода}} = 66578,7 \text{ Дж}.$$

Для третьей ступени:  $R = 286,689655 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $k = 1,4$ ;  $P_1 = 363,4 \text{ кПа}$ ;  $P_2 = 600 \text{ кПа}$ ;  $T_1 = 323 \text{ К}$ ;  $T_2 = 373 \text{ К}$ .

$$L_{3,\text{вода}} = 49915,7 \text{ Дж}.$$

Общая работа компрессора, используя промежуточный охладитель – воду:

$$\begin{aligned} L_{\text{общ.водяного охлаждения}} &= L_{1,\text{вода}} + L_{2,\text{вода}} + L_{3,\text{вода}} = \\ &= 56365 + 66578,7 + 49915,7 = 172859 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Рассчитаем работу сжатия при антифризе: предположим, что на выходе из ступени в промежуточных охладителях антифриз охлаждает воздух до  $0^\circ\text{C}$ .

Для первой ступени:  $R = 286,689655 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $k = 1,4$ ;  $P_1 = 94 \text{ кПа}$ ;  $P_2 = 181 \text{ кПа}$ ;  $T_1 = 273 \text{ К}$ ;  $T_2 = 323 \text{ К}$ .

$$L_{1,\text{антифриз}} = \left( \frac{k}{k-1} \right) \cdot T_1 \cdot R \cdot \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \left( \frac{1,4}{1,4-1} \right) \cdot 273 \cdot 286,689655 \cdot \left[ \frac{181^{\frac{1,4-1}{1,4}}}{94} - 1 \right] = 56365 \text{ Дж}.$$

Для второй ступени:  $R = 286,689655 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $k = 1,4$ ;  $P_1 = 181,71 \text{ кПа}$ ;  $P_2 = 363,4 \text{ кПа}$ ;  $T_1 = 273 \text{ К}$ ;  $T_2 = 353 \text{ К}$ .

$$L_{2,\text{антифриз}} = 59987 \text{ Дж}.$$

Для третьей ступени:  $R = 286,689655 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $k = 1,4$ ;  $P_1 = 363,4 \text{ кПа}$ ;  $P_2 = 600 \text{ кПа}$ ;  $T_1 = 273 \text{ К}$ ;  $T_2 = 373 \text{ К}$ .

$$L_{3,\text{антифриз}} = 42189 \text{ Дж.}$$

Общая работа компрессора, используя промежуточный охладитель – антифриз:

$$L_{\text{общ.антифриз}} = L_{1,\text{антифриз}} + L_{2,\text{антифриз}} + L_{3,\text{антифриз}} = \\ = 56365 + 59987 + 42189 = 158541 \text{ Дж.}$$

Найдем разницу в работе компрессорной установки на водяном охлаждении и на антифризе:

$$\Delta L = L_{\text{общ.водяного охлаждения}} - L_{\text{общ.антифриз}} = 172859 - 158541 = 14318 \text{ Дж.}$$

Найдем экономию использования охладителя-антифриза:

$$-\Delta E = \Delta L \cdot P = 14318 \cdot 1000 = 770308 \text{ Дж} \cdot \text{кг/с},$$

где  $P$  – производительность сжатого воздуха производства ОАО «Уральская сталь»,  $P = 53,8 \text{ кг/с}$ .

Годовая экономия энергии будет равна:

$$-\Delta E_{\text{год}} = 770308 \cdot 86400 \cdot 365 = 24,3 \text{ ТДж} \cdot \text{кг/с},$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что такое решение может дать большой энергосберегающий эффект.

#### Список литературы

1. Калинин Н. В., Кабанова И. А., Галковский В. А., Костюченко В. М. Системы воздухооборудования промышленных предприятий. Смоленск : Смоленский филиал МЭИ (ТУ), 2005. 122 с.
2. Чоджой М. Х. Энергосбережение в промышленности. М. : Металлургия, 1982. 272 с.
3. Баскаков А. П. Теплотехника. М. : Энергоатомиздат, 1991. 224 с.

УДК 621.313.8

Поздеев А. С., Казакбаев В. М., Прахт В. А., Дмитриевский В. А.  
Уральский федеральный университет,  
kazakbaiev@inbox.ru

## СОВРЕМЕННЫЕ ТИПЫ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА РОТОРЕ И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

В условиях ориентации промышленности на энергосберегающие технологии все большее внимание уделяется энергоэффективным электроприводам. Одним из таких электроприводов является электропривод с использованием двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе (ДПМР).

В настоящее время разработано множество типов ДПМР и методов управления ими, при этом действующий в России ГОСТ 27471-87, определяющий типы подобных электрических машин, не охватывает имеющееся много-

образии ДППМ, и при изучении современной научной литературы, составлении патентов и научных публикаций, описывающих такие машины, а также при стандартизации параметров ДППМ двигателей, могут возникнуть существенные трудности.

Целью настоящей работы является систематизация современных типов ДППМ и обобщение способов управления этими двигателями.

По форме противоЭДС ДППМ разделяются на следующие типы [1]:

- Brushless Direct Current Motor (BLDC motor) – ДППМ, имеющий трапецеидальную форму противоЭДС. В отечественной литературе – бесконтактный двигатель постоянного тока;

- Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) – ДППМ, имеющий синусоидальную форму противоЭДС;

- BLDC двигатели, как правило, используются в высокоскоростных приложениях (при скоростях вращения в десятки тысяч оборотов в минуту) и низкоскоростных приложениях, не требовательных к пульсациям момента.

Разновидностью BLDC двигателей, имеющих меньшие пульсации момента, является slotless BLDC (slotless PM) motor. Slotless BLDC motor – это BLDC двигатель, статорная обмотка которого выполнена без пазов. Один из примеров использования такого двигателя описан в [2].

PMSM двигатели по способу установки магнитов в роторе разделяются на следующие типы [1, 3]:

- Surface mounted permanent magnet (SMPM или SPM) motor – PMSM двигатель, у которого постоянные магниты расположены на поверхности ротора;

- Interior mounted permanent magnet (IMPM или IPM) motor – PMSM двигатель, у которого постоянные магниты встроены в тело ротора.

- SMPM двигатели в сравнении с IMPM более технологичны в изготовлении, вследствие чего более распространены, сравнение этих типов двигателей приведено в [3].

Все способы управления BLDC и PMSM двигателями разделяются на датчиковые (sensored control) и бездатчиковые (sensorless control), способы управления PMSM двигателями, кроме того, разделяются на скалярные и векторные. При датчиковом управлении ориентация магнитного поля статора осуществляется по информации с датчиков положения ротора. При бездатчиковом управлении ориентация магнитного поля статора осуществляется по вычисленному положению ротора или положение ротора для ориентации поля не используется (скалярные способы управления).

В качестве датчиков положения ротора у BLDC двигателей, как правило, используются датчики Холла, формирующие сигнал положения ротора с дискретностью 60 электрических градусов. Для управления PMSM двигателями требуется большая дискретизация положения ротора, и поэтому используются различного рода энкодеры, резольверы, датчики Холла с линейным выходом и пр.

Управление BLDC двигателем обеспечивается таким образом, что каждому из шести положений ротора в полюсе двигателя соответствует шесть определенных комбинаций замкнутых ключей трехфазного моста, тем самым обеспечивается необходимый сдвиг вектора тока статора относительно вектора потока ротора.

При датчиковом управлении BLDC двигателем может использоваться 120– или 180–градусная коммутация ключей. При 120 градусной коммутации ключи открыты в течение 120 электрических градусов, т. е. в каждый момент времени замкнуто два ключа. При 180–градусной коммутации ключи открыты в течение 180 электрических градусов, т. е. в каждый момент времени замкнуто три ключа. Сравнение 120– и 180–градусной коммутации приведено в [4].

При бездатчиковом управлении BLDC двигателем используется 120–градусная коммутация и положение ротора определяется по противоЭДС, наводимой в свободной от коммутации фазе [5].

Скорость ротора BLDC двигателей регулируется за счет изменения действующего значения тока статорных обмоток с использованием двух способов. По первому способу регулирование тока осуществляют за счет широтно-импульсной модуляции ключей моста; по второму способу регулирование скорости осуществляется за счет регулирования напряжения звена постоянного тока дополнительным step-down преобразователем с синхронным выпрямлением. Второй способ, как правило, используется для двигателей со скоростями вращения ротора в сотни тысяч оборотов в минуту [6]. Следует отметить, что для подобных высокоскоростных приложений использование датчиков Холла является затруднительным из-за низкого их быстродействия, и зачастую бездатчиковые способы управления более эффективны и просты.

Скалярное управление PMSM двигателями аналогично скалярному управлению асинхронными двигателями – в зависимости от характеристики нагрузки обеспечивается необходимое соотношение амплитуды и частоты питающего напряжения, например,  $U/f = \text{const}$ .

Точность скалярного управления может быть существенно повышена за счет использования в контуре токов дополнительного компенсирующего сигнала, вычисленного в системе координат, вращающейся синхронно с оцениваемым положением ротора. Данный метод при своей простоте обеспечивает точность, конкурирующую с точностью при векторном управлении [7].

При векторном управлении PMSM общим для всех способов является наличие замкнутого по положению ротора контура формирования статорных напряжений и токов.

Отличия режимов векторного управления заключаются в способе получения сигнала положения ротора. При датчиковом управлении сигнал положения ротора уже имеется в системе управления и ее синтез не представляет сложности. При бездатчиковом управлении используются следующие основные методы вычисления положения ротора:

- вычисление положения ротора по углу вектора противоЭДС, наводимой в статорных обмотках двигателя. Данный способ достаточно простой и эффективный, но может использоваться для ограниченного диапазона скоро-

стей из-за сложности детектирования противоЭДС на малых скоростях. Способ может использоваться для SMPM и IMPM двигателей. Вариацией данного способа является вычисление угла ротора по углу вектора потока ротора, однако этот способ сложнее при той же точности [1];

- вычисление положения ротора по изменению индуктивности обмоток статора в осях  $d$  и  $q$ . Данный способ обеспечивает большую, чем описанный выше метод, точность, но требует калибровки двигателя и преобразователя частоты для определения зависимости индуктивности обмоток от положения ротора в полюсе двигателя. Метод использует для вычисления мгновенные значения вычисленных противо-ЭДС и так же, как предыдущий метод, может использоваться в ограниченном диапазоне скоростей. Использование этого метода более эффективно для IMPM двигателей [1];

- вычисление положения ротора с использованием инъекции высокочастотного сигнала в сигнал задания по напряжению статора. Этот метод, как и предыдущий, основан на изменении индуктивности обмоток статора в осях  $d$  и  $q$ , что вызывает различный отклик инжектированного сигнала по указанным осям. Этот метод является самым точным среди бездатчиковых методов, так как обеспечивается управление двигателем во всем диапазоне скоростей, в том числе при работе электропривода «на упор» при нулевой скорости. Недостатком данного метода является необходимость реализации сложных алгоритмов фильтрации (как правило, используется фильтр Калмана) и калибровки двигателя и преобразователя частоты аналогично предыдущему методу. Использование этого метода более эффективно для IMPM двигателей [1; 8].

Существенным недостатком методов, использующих вычисление противоЭДС, является зависимость точности вычисления положения ротора от точности используемого в расчетах значения активного сопротивления ротора и индуктивности обмоток статора, которые при нагреве двигателя существенно изменяются. Методы компенсации изменения активного сопротивления и индуктивности обмоток статора приведены в [9; 10].

Экспериментальное сравнение описанных методов управления PMSM двигателями приведено в [1].

Несмотря на имеющееся многообразие типов ДПМР и способов управления ими, они продолжают бурно развиваться, что обусловлено ориентацией промышленности и народного хозяйства на энергосберегающие технологии и расширением спектра применения ДПМР.

#### Список литературы

1. Zhao Yue. Position/speed sensorless control for permanent-magnet synchronous machines // Electrical Engineering Theses and Dissertations. Paper 51. 2014.
2. Nicola Bianchi. High Speed Drive Using a Slotless PM Motor // IEEE Transactions on power electronics. July 2006. Vol. 21. № 4.
3. Vagati A., Pellegrino G., Guglielmi P. Comparison between SPM and IPM motor drives for EV application [Электронный ресурс]. // XIX International Conference on Electrical Machines ICEM. 2010. Rome (дата обращения: 05.11.2014).

4. Воронин С. Г., Курносков Д. А., Кульмухаметова А. С. Сравнительная оценка различных способов управления коммутацией вентильных двигателей по энергетическим показателям и энергетическим свойствам // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2013. Т. 13, № 1.
5. Jianwen Shao. Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC). Blacksburg, Virginia : Virginia Polytechnic Institute, 2003.
6. Christof Zwyssig, Johann W. Kolar, Simon D. Round. Megasppeed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million r/min // IEEE/ASME Transactions on mechatronics. October 2009. Vol. 14, № 5.
7. Jun-ichi Itoh, Naofumi Nomura, Hiroshi Ohsawa. A Comparison between V/f Control and Position-Sensorless Vector Control for the Permanent Magnet Synchronous Motor. Osaka : PCC-Osaka, 2002.
8. Sensorless PMSM Drive With DC-Link Current Measurement / Piippo A., Suomela K., Hinkkanen M. and Luomi J. // Conference Record of the 42nd IEEE Industry Applications Society (IAS) Annual Meeting. New Orleans, 2007. P. 2371–2377.
9. Performance Improvement of a PMSM Sensorless Control Algorithm Using a Stator Resistance Error Compensator in the Low Speed Region / Nung-Seo Park, Min-Ho Jang, Jee-Sang Lee, Keum-Shik Hong and Jang-Mok Kim // Journal of Power Electronics. September 2010. Vol. 10. № 5. P. 477–484.
10. Investigation of PMSM Back-EMF using Sensorless Control with Parameter Variations and Measurement Errors / Zihui Wang, Qinfen Lu, Yunyue Ye, Kaiyuan Lu, Youtong Fang. // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review). 2012. NR 8. P. 88.

УДК 621.3

Покрышкин Б. А., Ковалев А. А.  
Уральский государственный университет путей сообщения  
boryani4@mail.ru, AKovalev@usurt.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ САПР ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

Контактная сеть является подсистемой сложной технической системы – электрический транспорт. Одна из главных функций контактной сети – распределение и подвод электрической энергии к электроподвижному составу посредством контакта с токоприемником. Токосъем осуществляется в динамической системе контактная подвеска–токоприемник. Обеспечение качественного токосъема является важной задачей для устойчивой работы транспорта.

К конструкции контактной сети предъявляются повышенные требования надежности, так как на нее воздействуют токовые (тяговые), механические и климатические нагрузки. Контактная сеть обязана обеспечить бесперебойную эксплуатацию при огромном количестве последовательно соединенных узлов. Переход любого из этих узлов в предельное состояние (разрушение, потеря несущей способности или устойчивости, недопустимые деформации) приводит к отказу всей системы, а соответственно и к перерыву движения поездов.

Проектирование деталей контактной сети занимает много времени и требует большой точности расчетов. Сегодня, чтобы испытывать их на прочность, необходимо выполнять множество вычислений, прибегая к немалому количеству допущений.



Одними из уязвимых элементов контактной сети являются контактные провода и зажимы (рис. 1).

В случае повреждения контактного провода, его заменяют на новый с применением стыкового зажима марки КС–059–6 (КС–321–1), представленного на рис. 1, основные параметры которого приведены в таблице.

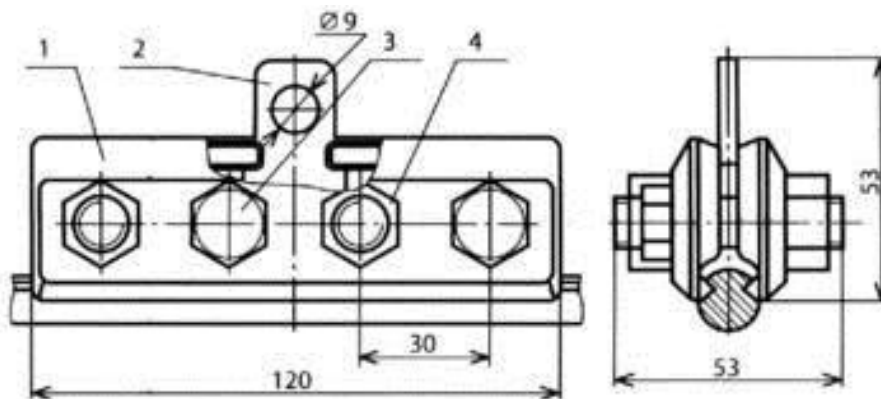


Рис. 1. Зажим стыковой контактного провода КС–059–6 (КС–321–1)

Основные характеристики зажима КС–059–6

Поз.	Наименование детали	Материал, покрытие	Допустимая нагрузка, кН	Масса, кг
1	Плашка	БрАЖ9-4	$P_2=12,0$	0,8
2	Вкладыш	БрАЖ9-4		
3	Болт М1х40 4 шт.	Ст-Цфос		
4	Гайка М10 4 шт.	Ст-Цфос		

Зажим предназначен для стыкования контактных проводов сечением 100–120 мм<sup>2</sup>.

Для того чтобы убедиться в надежности данного зажима, были проведены в НИЛ САПР КС УрГУПС механические испытания модели зажима, созданной с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР) – *SolidWorks*.

*SolidWorks* – программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства, который обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения, позволяет увидеть будущее изделие в объеме с разных сторон, придать ему реалистичность отображения в соответствии с избранным материалом для пробной оценки дизайна [1].

*SolidWorks* также позволяет решить следующие задачи:

- 3D–проектирование изделий (деталей и сборок) любой степени сложности с учетом специфики изготовления;
- создание конструкторской документации в строгом соответствии с ГОСТами;
- промышленный дизайн;
- проектирование коммуникаций (электрожгуты, трубопроводы и пр.);
- экспресс-анализ технологичности на этапе проектирования;

– инженерный анализ (прочность, устойчивость, теплопередача, частотный анализ, динамика механизмов, газогидродинамика, оптика и светотехника, электромагнитные расчеты, анализ размерных цепей и пр.).

Испытания включали в себя исследования на термомеханическую прочность. При этом задавалась температура класса «А» нагревостойкости, равная 105 °С, которая прикладывалась в паз для закрепления контактного провода.

Полученные результаты приведены на рис. 2.

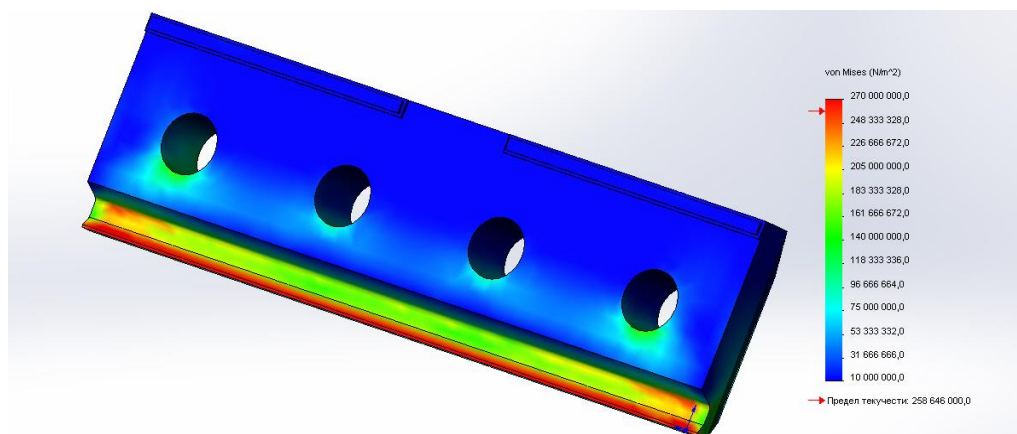


Рис. 2. Распределение напряжения в плашке зажима

Из диаграммы напряжения в металле следует, что максимальное напряжение материала БрЖА-9 составляет  $258,646 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ , а наибольшие напряжения возникают в пазах плашки зажима и не превышают предела текучести данного металла. Следовательно, характеристики соответствуют заявленным в каталоге арматуры контактной сети электрифицированных железных дорог [2].

С целью повышения надежности деталей контактной сети и совершенствования качества токосъема можно проводить испытания различных материалов, форм зажимов и прогнозировать их работу под теми или иными нагрузками при воздействии внешних факторов.

Применение методов компьютерного моделирования позволяет сократить затраты на испытание устройств. В настоящий момент в УрГУПС ведутся работы по повышению надежности работы и качеству обслуживания устройств системы токосъема. Для реализации указанных технологий на практике в 2014 году планируется провести их внедрение на существующих участках ОАО РЖД, а при положительном результате натурных испытаний станет возможным применение их на новых участках с более высокими скоростями движения.

#### Список литературы

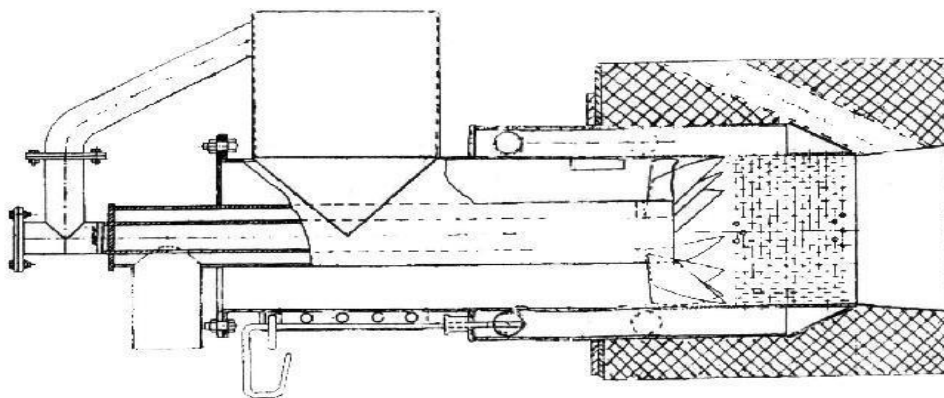
1. *SolidWorks Russia* : Официальный русскоязычный сайт программных продуктов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.solidworks.ru> (дата обращения: 06.10.14).
2. Каталог арматуры контактной сети электрифицированных железных дорог / Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. М. : Трансиздат, 2000. 128 с.

## УТОЧНЕНИЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О КРУТКЕ ПОТОКА, ФОРМИРУЮЩЕГО ФАКЕЛ, С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРЕНИЯ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ

Специалистам известно, что интенсивность крутки потока при выходе из горелки в топку определяет почти все характеристики факела. Прежде всего, от нее зависит надежность стабилизации горения, размеры горящего факела. Она влияет также на полноту сгорания топлива и экологическую безопасность. Известно также, что современный процесс стадийного факельного сжигания в атмосфере дефицита кислорода жестко зависит от крутки воздушных потоков, определяющих аэродинамическую структуру отдельных потоков и суммарного факела в целом. Сама структура индивидуального факела вихревой горелки, в свою очередь, исключительно определяется конструктивными особенностями ее завихрителей воздуха (регистров), длиной и формой выходных каналов и конструкцией амбразуры. Эти свойства индивидуальных факелов горелок, их крутки определяют взаимодействие в топке индивидуальных факелов горелок, формирующих суммарный или результирующий горящий факел.

Авторами проанализирован опыт исследования моделей горелок новым способом управления закрученными потоками, разработанным и изученным на кафедре ТЭС ранее, и выполнены необходимые пересчеты структуры потоков на выходе из этих горелок с точки зрения новых уточненных представлений о формировании крутки отдельных слоев этих потоков. Механизм управления работой такой горелки теперь также известен. Это струйный радиальный вдув (СРВ) части воздуха через перфорированную стенку ее выходного цилиндрического канала. При этом ранее была получена и многократно подтверждена рекордная, по сути, глубина воздействия СРВ на структуру и крутку формируемого горелкой потока (вихря) и полученные им часто необычные характеристики горящих факелов в пространстве за горелкой. Характер влияния СРВ одной из горелок на крутку результирующего потока (вихря) показаны на рис. 1, а.

а



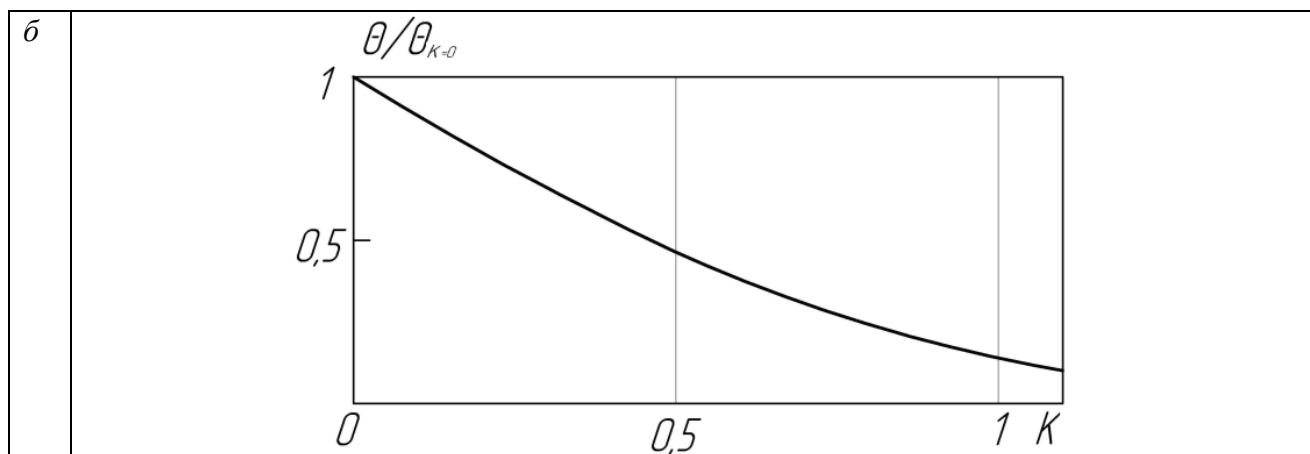


Рис. 1. Опытная горелка с управляющим СРВ (а) и характер изменения крутки потока на входе из горелки при включении и усилении СРВ через стенку в зависимости от безразмерного импульса управляющего вдува  $K$  (б)

Один из вариантов внедрения СРВ даже слабой интенсивности показал на горелках котлов ПК-47 практически рекордные отечественные показатели содержания в дымовых газах оксидов азота (всего 100–115 мг/м<sup>3</sup>) без газовой рециркуляции и схем двухстадийного сгорания, с полным сгоранием газа при самых низких в стране избытках воздуха за топками котлов энергоблоков ТЭС (не более 1,02). Интенсивность крутки вихря на выходе из разных схем горелок определялась традиционно (по Дубовопу, Бэру, Червинскому, Лойцянскому):

$$\Theta = C \cdot M_{\text{вых}} / K_{\text{вых}} \cdot D. \quad (1)$$

Этот метод считается пока наиболее приемлемым. Здесь  $C$  равно 4, а  $D$  равна внутреннему диаметру амбразуры горелки. Позже установлено, что в реальности крутка отдельных слоев вихря существенно неравномерна и сильно отличается от интегральной, рассчитанной по формуле (1), изменяясь по радиусу потока. Особенно сильны изменения местной крутки отдельных слоев при регулировании горелкой с помощью СРВ в горелке такого типа, показанной на рис. 1. Для оценки местной крутки были предложены формулы. Из них, видимо, самой объективной является выражение

$$\omega_i = 2 \rho_{mi} / (r_i \cdot \rho_{ki}). \quad (2)$$

В этой формуле использовано отношение плотностей потоков момента и осевого импульса выделенного кольца радиуса  $r_i$  в объеме потока (вихря).

При трансформации вихря на выходе из горелки управляющим СРВ лишь крутка сужающейся зоны осевого обратного тока (ЗОТ) имеет тот же характер изменения, что и у крутки всего потока. Но изменения крутки других характерных зон вихря уже сильно не совпадали с изменениями крутки всего потока. Далее местную крутку любых выделенных нами зон обозначим через отношение к местной крутке того же кольца в режимах без включения СРВ —  $\omega/\omega_{k=0}$ . Например, так называемая зона квазипотенциального вращения (ЗКПВ) (рис. 2, а), содержащая базовую часть вихря, — от пристенной зоны до внешней границы зоны осевого обратного тока (ЗОТ), — имеет иной характер, чем в ЗОТ, показанной правее (рис. 2, б). Однако для инженерной практики при анализе работы, для проектирования горелок и для адекватных оценок наиболее инте-

ресным и важным является полученное изменение безразмерной крутки в цилиндрической зоне условного ядра потока (ЯП), включающей сумму зон ЗКПВ и ЗОТ (рис. 2, в).

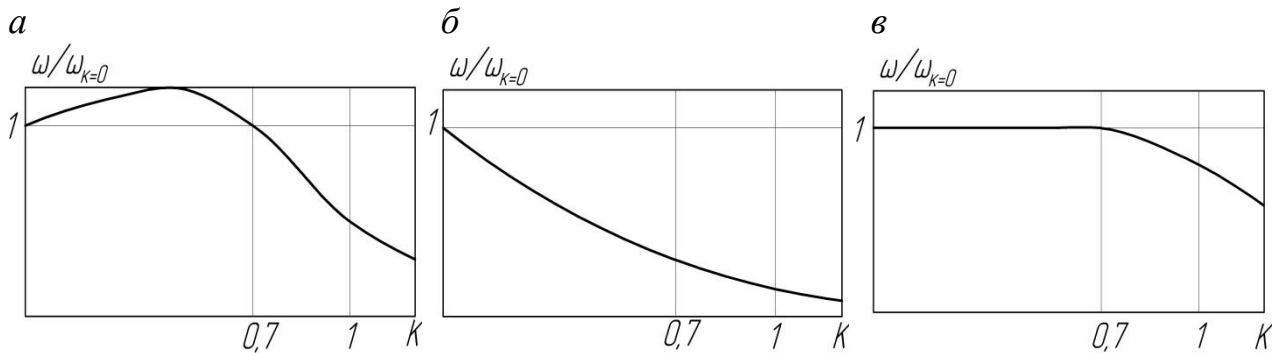


Рис. 2. Относительная крутка зон потока (вихря) при включении СРВ:  
а – ЗКПВ; б – ЗПОТ; в – ЯП

Сопоставляя графики на рис. 1, б и 2, б, можно установить, что до режима СРВ, в котором  $k \leq 0,7$ , крутка зоны ЯП не изменится, хотя крутка всего потока или вихря уменьшается примерно в 3 раза, выходя за пределы поддержания на практике условий самовоспламенения горящего факела у обычных горелок с таким же лопаточным завихрителем воздуха. Только при усилении СРВ до режимов  $k > 0,7$  крутка зоны ЯП начинает снижаться. Это означает, что горелки с применением управляющего СРВ по схеме, как на рис. 1, а, должны полностью сохранять условия устойчивого воспламенения топлива в факеле при снижении крутки суммарного потока ниже уровней, при которых обычно происходит погасание или обрыв горящего факела в топке. То есть использование СРВ обеспечит экономию энергии на дутье, а удлинение результирующего факела с потерей его крутки может обеспечить снижение выхода оксидов азота при сохранении полноты выгорания топлива.

В 2005 г. все это было доказано экспериментально на опытной горелке для небольшого отопительного котла (рис. 3).



Рис. 3. Факелы одной и той же горелки:  
а – без СРВ и при слабом СРВ ( $0 < k < 0,3$ ); б – при сильном СРВ ( $0,7 < k < 0,9$ )

Факелы на рис. 3, *а* аналогичны факелам большинства известных конструкций вихревых горелок. Факелы на рис. 3, *б* уже не получить обычными горелками. Еще сильнее отличаются факелы при усилении СРВ до  $k \approx 1,2-1,4$ , показанные на рис. 4.



Рис. 4. Устойчивое горение газа в особых тороидальных факелах, оторванных от горелки, с характерным постепенным сгоранием промежуточных продуктов горения пропана в явно восстановительной атмосфере

Они демонстрируют горение газа в свободном пространстве с полным отрывом от горелки. Этот результат, видимо, уникален. Его можно рассматривать как базу для создания новых вихревых горелок низкотоксичного сжигания имеющих специальные камерные топки нового типа.

УДК 699.86

Попова А. П., Бакрунова Т. С.  
Самарский государственный технический университет  
andryanna@bk.ru

## ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗДАНИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Сегодня вопрос тепловой эффективности является весьма актуальным, так как пришла новая эра – экономии тепловой энергии.

Повышение эффективности использования теплоты является одной из составляющих энергосбережения. Выполнение этого требования определяется комплексом конструктивно-планировочных решений зданий и инженерных мероприятий, направленных на обеспечение оптимального теплового режима в отапливаемых помещениях при наименьших затратах тепловой энергии.

На процесс теплоотдачи зданий оказывает существенное влияние объемно-пространственная композиция здания и его конструктивные параметры, теплозащитные свойства наружных ограждающих конструкций, размеры и конструкции заполнения световых проемов, способы обогрева и регулирования теплоотдачи в отапливаемые помещения.



Создание комфортных условий для работающего человека – важная составляющая для качественного и успешного производства. В понятие «комфортные условия», прежде всего, входит хорошее отопление промышленных помещений. Порой это сделать не так уж просто, потому что для размещения системы отопления на огромных складах, в цехах и ангарах требуются достаточно большие экономические затраты. Более того, нужно грамотно спроектировать систему отопления, чтобы она была эффективной и действенной, а ее устройство отвечало особым строительно-технологическим требованиям [1]:

- санитарно-гигиеническим;
- строительным;
- монтажным;
- эксплуатационным;
- экономическим.

На данный момент для обогрева промышленных объектов используются различные способы отопления, наиболее часто используемые:

- централизованное водяное отопление;
- обогрев циркулирующим нагретым воздухом;
- отопление при помощи электрического оборудования;
- системы лучистого отопления.

Централизованное водяное отопление промышленных зданий предусматривает обязательное оборудование котельной и закрепление нескольких специалистов, которые будут следить за ней. На крупных объектах водяное отопление является не всегда целесообразным в силу больших помещений, которые сложно прогреть подобным способом. Также затруднена прокладка труб.

Отопление промышленных зданий системами циркуляции горячего воздуха лишены подобных недостатков, но являются достаточно дорогостоящими. За ними также должен следить специалист, услуги которого нужно будет оплачивать. Кроме того, данная система отопления довольно сложна, отличается большим числом оборудования для обеспечения правильной циркуляции. Также необходима прокладка большого числа воздуховодов, что портит общее восприятие объекта, или требуется скрыть их из виду.

Электрооборудование вроде тепловых пушек достаточно эффективно, но оно имеет свойство перегревать и пересушивать воздух. Кроме того, обогрев помещений подобным способом довольно дорогой.

Одним из прогрессивных методов отопления помещений большой площади является лучистое отопление, которое по сравнению с классическим паровым и газовым отоплением требует значительно меньших затрат. Экономия достигается как в потреблении сжигаемого топлива, так и в общих более низких затратах на отопление. Системы лучистого отопления являются одними из наиболее перспективных, комфортных, экологических и энергоэффективных, но применяются пока недостаточно [2].

Исследования показывают, что при эксплуатации зданий через стены теряется до 40 % тепла, через окна – 18 %, подвал – 10 %, покрытия – 18 %, вентиляцию – 14 %. Ставя задачу уменьшения теплопотерь, необходимо осознать

важность комплексного подхода к использованию современных теплоизоляционных материалов. Это значит, что наряду с очевидной необходимостью повышения тепловой сопротивляемости ограждающих конструкций, крыш, окон и перекрытий, также не обойтись без модернизации инженерных систем – вентиляции и теплоснабжения.

Основные методы достижения энергетической эффективности зданий:

- повышение тепловой эффективности ограждающей оболочки здания, включая стены, покрытия и окна;
- повышение регулируемости систем отопления и теплоснабжения зданий;
- повышение эффективности эксплуатируемых систем теплоснабжения, в том числе применение альтернативных систем децентрализованного теплоснабжения;
- внедрение систем принудительной вентиляции с применением систем рекуперации тепла вытяжного воздуха.

Наиболее предпочтительным способом повышения эффективности ограждающей оболочки здания считается наружная теплоизоляция стен с применением эффективных теплоизоляционных материалов. При этом обеспечивается значительное повышение теплотехнической однородности наружных ограждений, простота конструктивных решений дополнительной тепловой защиты, сохранение полезной площади, улучшение температурно-влажностного режима существующих наружных ограждений.

Распространение в строительной практике получили конструкции наружной теплоизоляции, которые условно можно разделить на мокрые системы с оштукатуриванием плитного утеплителя и сухие вентилируемые системы с облицовкой на отnose от слоя теплоизоляции.

Создание автоматизированной системы управления тепловым режимом производственных помещений обеспечивает эффективное решение комплекса задач, связанных с повышением качества и надежности регулирования, экономией тепловой и электрической энергии, снижением трудозатрат на обслуживание и профилактику системы теплоснабжения и т. д.

Использование систем децентрализованного теплоснабжения позволяет устранить ряд проблем, которые возникают при централизованном отоплении. Во-первых, в несколько раз уменьшаются непроизводительные затраты топлива, электроэнергии и материалов, связанные с эксплуатацией тепловых сетей. Во-вторых, повышается надежность теплоснабжения, так как вероятность одновременной аварии нескольких котельных гораздо меньше, чем одной. В-третьих, устраняется инертность работы системы теплоснабжения. Тем самым повышается качество услуги по теплоснабжению и уменьшаются затраты.

Внедрение систем принудительной вентиляции с применением систем рекуперации тепла вытяжного воздуха создает условия комфорта для человеческого организма. Лучше всего человек чувствует себя при уровне влажности 50–65 %. В период работы систем отопления и без того сухой зимний воздух теряет еще больше влаги из-за контакта с нагретыми теплоносителем, нередко уровень влажности снижается до 25–30 %. Такой показатель способствует дис-



комфортным ощущениям человека, а также наносит существенный вред его здоровью.

Таким образом, можно сделать вывод, что для достижения существенного увеличения теплоэффективности промышленных помещений требуется тщательное изучение теплового режима здания в целом, включая натурные исследования.

#### Список литературы

1. Богословский В. Н., Сканава А. Н. Отопление. М. : Стройиздат, 1991. 736 с.
2. Лучистое отопление [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fraccaro.it/fweb/index.php?/base/irrag/ru/all/> (дата обращения: 16.10.2014).

УДК 620.97

Попова Е. С., Чайникова М. А., Шемпелев А. Г.  
Вятский государственный университет (г. Киров)  
ekaterina\_popova\_1993@list.ru

### **СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ С УХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ ВОДОГРЕЙНОЙ КОТЕЛЬНОЙ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАТНОЙ СЕТЕВОЙ ВОДЫ**

В настоящее время в отрасли коммунальной теплоэнергетики сложилась напряженная ситуация, обусловленная, с одной стороны, дефицитом и все возрастающей дороговизной топлива, с другой – неудовлетворительным техническим состоянием оборудования, в частности котельных установок, эксплуатируемых с низкими значениями коэффициентов полезного действия.

Одним из путей решения этой проблемы является разработка технологий глубокой утилизации теплоты уходящих газов из котлов, в которых за счет снижения их температуры ниже температуры точки росы используется не только физическая теплота газов (около 7–8 %), но и теплота конденсации водяного пара, содержащегося в них (около 10 %). Внедрение таких технологий позволяет существенно (на 10–15 %) повысить эффективность использования теплового потенциала газообразного топлива и обеспечить его экономию [1].

Рассмотрим график выделения теплоты из паровоздушной смеси (рис. 1).

Из анализа графика можно сделать два важных вывода. Первое – температура точки росы равна температуре, до которой охладили дымовые газы. Второе – необязательно проходить всю зону конденсации, что не только практически невозможно, но и не нужно. Это, в свою очередь, обеспечивает различные возможности реализации теплового баланса. Другими словами, для охлаждения дымовых газов можно использовать практически любой небольшой объем теплоносителя.



Рис. 1. Выделение теплоты из паровоздушной смеси

При этом охлаждение дымовых газов должно осуществляться в теплообменниках специальной конструкции, зависящей в основном от температуры уходящих газов и температуры охлаждающей воды. Применение воды в качестве промежуточного теплоносителя является наиболее привлекательным, так как в этом случае можно использовать воду с наиболее низкой температурой.

Разработанная нами одна из принципиальных схем глубокой утилизации теплоты уходящих газов представлена на рис. 2.

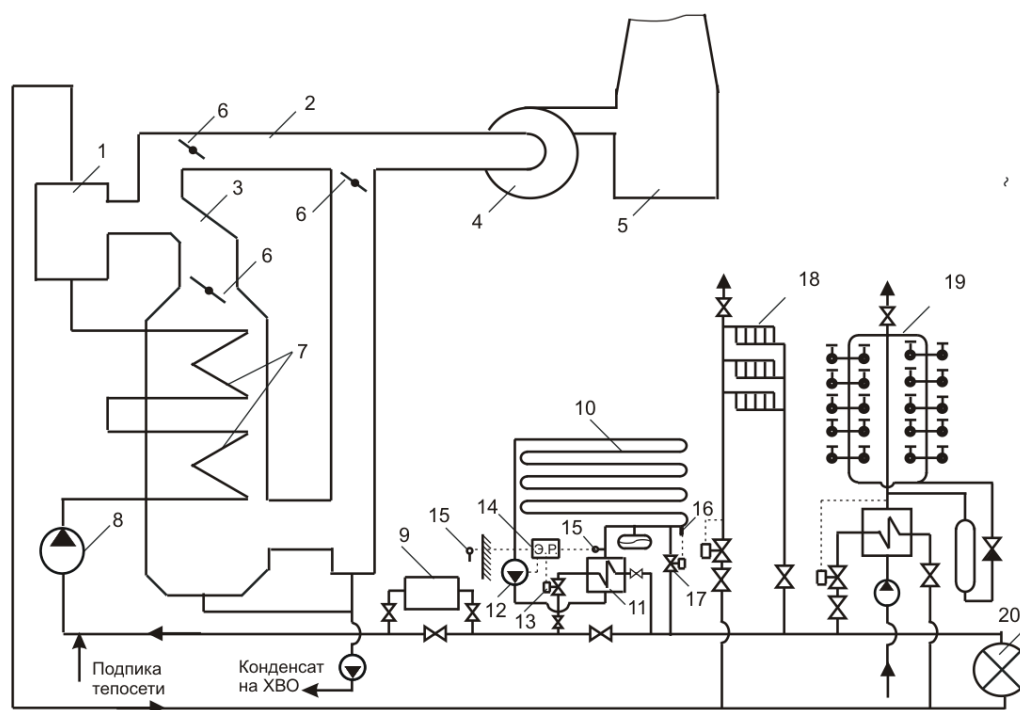


Рис. 2. Принципиальная схема утилизации теплоты уходящих газов водогрейного котла за счет снижения температуры обратной сетевой воды:

1 – водогрейный котел; 2 – основной газоход; 3 – газоход водяного экономайзера; 4 – дымосос; 5 – дымовая труба; 6 – шиберные заслонки; 7 – конденсирующий водяной экономайзер; 8 – сетевой насос; 9 – обогрев ступеней лестниц и открытых площадок, снегоплавильные устройства; 10 – система «теплого пола»; 11 – теплообменник системы «теплого пола»; 12 – циркуляционный насос; 13 – регулятор расхода; 14 – электронный регулятор; 15 – датчики температуры; 16 – датчик давления; 17 – регулятор давления; 18 – система отопления; 19 – система горячего водоснабжения; 20 – остальные потребители теплоты

Целью настоящей статьи является определение целесообразности применения различных систем, способствующих снижению температуры обратной сетевой воды, и способов организации глубокой утилизации теплоты уходящих газов путем конденсации теплоты из уходящих газов.

Таковыми системами могут быть (рис. 2):

- низкопотенциальные отопительные системы типа «теплый пол»;
- системы обогрева ступеней лестниц и открытых площадок;
- устройства для утилизации снега путем плавления.

На данном этапе рассмотрен вопрос использования низкопотенциальной теплоты, используемой в системах теплоснабжения.

В качестве объекта исследования выбран 8-ми этажный дом, шесть этажей сверху которого оборудованы радиаторными батареями, а два последних – системой «теплый пол».

Прямая сетевая вода температурой 95 °С проходит контур радиаторных батарей (6 этажей), контур теплых полов (2 этажа). Обратная сетевая вода выходит при некоторой температуре, которая ожидается не более 35 °С (произведен расчет). Далее охлажденная вода поступает в экономайзер-утилизатор, в котором от газов отнимается не только физическая теплота, но и теплота конденсации водяных паров. После экономайзера-утилизатора вода поступает в котел, в котором нагревается до заданной температуры и отправляется снова к потребителю.

В результате расчета были определены возможное уменьшение потерь теплоты с уходящими газами и средний прирост КПД в течение отопительного сезона. Снижение температуры приводит к снижению энтальпии уходящих газов на 130 кДж/кг, чему соответствует прирост КПД в размере 4,1 %; на долю конденсации приходится 138 кДж/кг (прирост КПД 4,4 %). Суммарный прирост КПД в этом случае составит 8,5 %.

#### Список литературы

1. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа / Н. М. Фиалко, Ю. В. Шеренковский, А. И. Степанова, Р. А. Навродская, П. К. Голубинский, М. А. Новаковский // Промышленная теплотехника. 2008. № 3. С. 68–76.

УДК 621.499

Рахимова Л. М., Бабин Р. В., Демин Ю. К., Картавец С. В.  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ)  
rahimova\_06@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ СЖАТИЯ В АБХМ

В Российской Федерации на промышленных предприятиях широко распространено использование сжатого воздуха как энергоносителя. Сжатый воз-

дух имеет ряд существенных преимуществ перед другими теплоносителями: пожаро- и взрывобезопасность, нетоксичность, отсутствие потерь на конденсацию. Однако воздух является весьма энергоемким продуктом: так на привод центробежных компрессоров расходуется около 20 % всей генерируемой в стране электрической энергии [1].

Для экономии энергии на привод в компрессорных установках применяют промежуточное охлаждение сжимаемого воздуха в вынесенных газоохладителях, установленных между группами ступеней сжатия. При этом величина отводимого теплового потока сопоставима с мощностью привода компрессора. Однако в настоящее время почти вся эта теплота никак не используется и выбрасывается в окружающую среду на градирнях или в прудах-охладителях.

Необходимо отметить, что температура сжатого воздуха на входе в промежуточный охладитель может достигать 150–200 °С, в зависимости от типа установки.

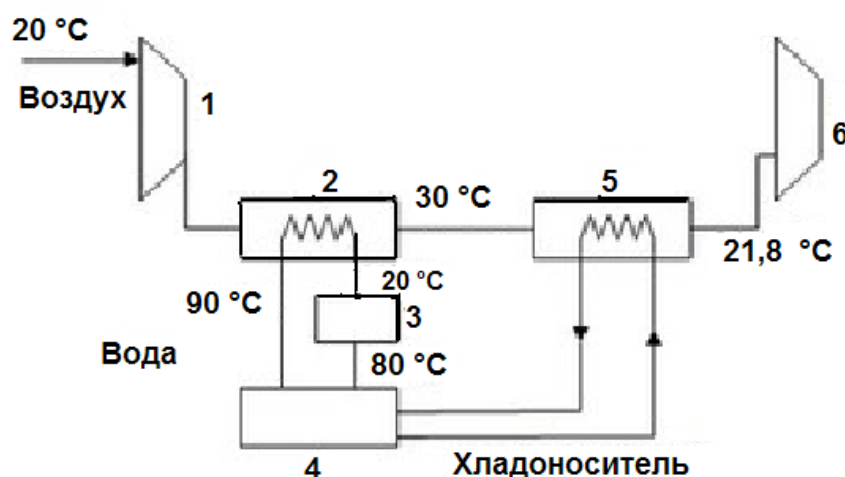
Таким образом, возникает задача по использованию отводимой от компрессора теплоты. При этом в первую очередь необходимо рассматривать такие направления, которые позволили бы направить тепловой поток на покрытие собственных нужд установки.

Для работы компрессорной установки необходимы источники механической работы (для привода) и холода (для охлаждения сжимаемого воздуха).

Температурный уровень в промежуточном газоохладителе позволяет нагреть теплоноситель до температуры свыше 70 °С, чего достаточно для генерации холода в абсорбционных бромистолитиевых холодильных машинах (АБХМ). Затем полученный холод можно направить на доохлаждение сжатого воздуха в охладителе.

Для оценки энергосберегающего потенциала за счет генерации холода на теплоте сжатия было рассчитано двухступенчатое сжатие с одним промежуточным газоохладителем. Для расчетов было принято: температура воздуха на входе 20 °С, сжатие в компрессоре – адиабатное, давление воздуха на выходе из компрессора 0,54 МПа. Охлаждающим теплоносителем является вода с начальной температурой 20 °С. Для генерации холода была рассмотрена одноступенчатая АБХМ [2]. Расчетная схема изображена на рисунке. Ниже представлены результаты расчетов:

температура воздуха на входе в охладитель, °С.....	100
температура воздуха на выходе из охладителя, °С.....	30
температура охлаждающей воды на выходе из охладителя, °С.....	90
температура воды на выходе из АБХМ, °С.....	80
холодопроизводительность АБХМ, кВт/кг сжатого воздуха.....	8,2
температура сжатого воздуха после доохлаждения, °С.....	21,8
экономия энергии от доохлаждения, кДж/кг сж. воздуха.....	2,52
экономия энергии от доохлаждения, % от затрачиваемой.....	1



Расчетная схема:

1, 6 – ступени компрессора; 2 – промежуточный газоохладитель; 3 – градирия;  
4 – АБХМ; 5 – доохладитель сжатого воздуха

Таким образом, использование теплоты сжатия для генерации холода может позволить повысить эффективность работы компрессора на 1 %. Тем самым, учитывая масштабы производства сжатого воздуха, открываются возможности по значительной экономии электроэнергии.

Список литературы

1. Сычков А. Е. Роль эффективных систем охлаждения в современных компрессорных установках // Мегапаскаль. 2009. № 4. С. 36–40.
2. Мартынов А. В. Установки для трансформации теплоты и охлаждения. М. : Энергоатомиздат, 1989. 200 с.

УДК 661.52

Ряпосов А. В., Костромин К. В.<sup>1</sup>, Хомяков А. П.<sup>2</sup>  
Свердловский научно-исследовательский институт химического машиностроения<sup>1</sup>,  
ryantony@mail.ru, kostromin@sniihim.ru  
Уральский федеральный университет<sup>2</sup>, a.p.khomiakov@urfu.ru

## ПУТИ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛА В НОВОМ МЕТОДЕ РАЗРУШЕНИЯ СОЛЕЙ АММОНИЯ

Проведены испытания бака-реактора для окислительного разрушения солей аммония. Целью испытаний являлась обкатка оборудования и проверка в укрупненных масштабах режимов окислительного разрушения нитрата аммония, ранее отработанных в лабораторных условиях в Радиевом институте им. В. Г. Хлопина.

В бак-реактор с раствором нитрата аммония подается формалин с заданным расходом. Корпус бака-реактора внутри снабжен змеевиком, чтобы подавать горячий конденсат для обогрева или подавать охлаждающую воду в целях снижения температуры раствора. Снаружи бак-реактор снабжен двумя ленточными нагревателями и теплоизоляцией из минеральной ваты для компенсации теплопотерь.

В данной статье рассмотрены возможности энергосбережения, определяемые природой химического процесса окислительного разрушения иона аммония.

Суть отрабатываемого процесса заключается в окислении иона аммония азотной кислотой в присутствии индуктора, в роли которого выступает формальдегид [1], который вводят в реакцию в виде технического формалина. Механизм процесса характеризуется сложным набором параллельно-сопряженных реакций, и в зависимости от исходных условий процесс может обладать значительным индукционным периодом. Реакции имеют высокие энергии активации и при комнатной температуре практически не идут. Весь процесс в целом является экзотермическим. Тепловой эффект, оцененный экспериментально, равен ~300 кДж на 1 моль добавленного формальдегида. Именно этот факт дает принципиальную возможность для снижения энергозатрат при его проведении.

Рассмотрим конкретнее, как велись эксперименты и что можно было бы поменять в целях энергосбережения.

Все опыты были проведены при исходном заполнении бака-реактора на 30 %. По ходу экспериментов определялись текущая кислотность и концентрация аммония [2]. Концентрацию исходного формалина определяли по методике, приведенной в [3].

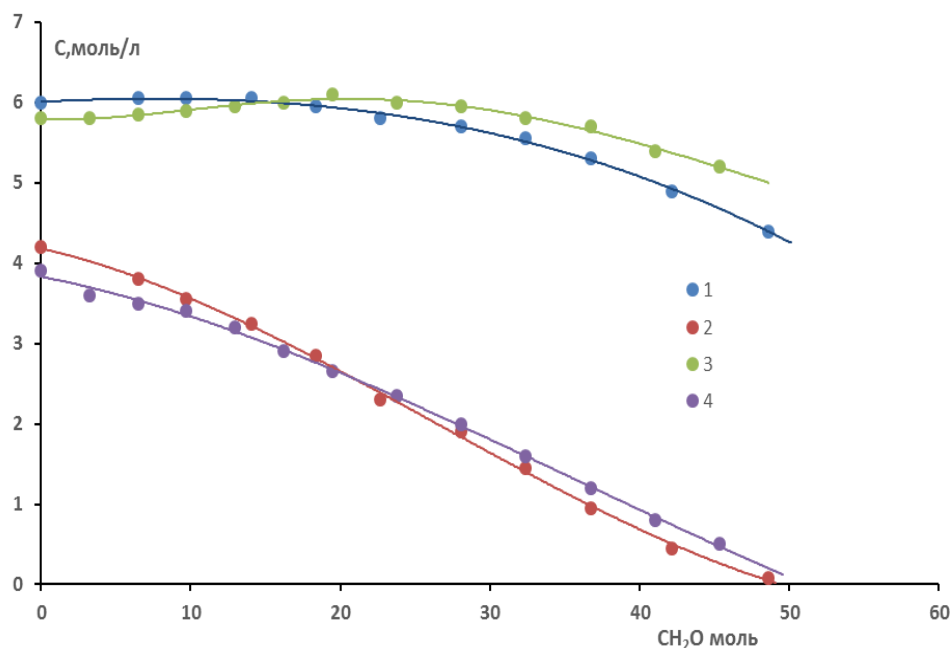
За время испытаний проведены предварительные и количественные эксперименты при температурах от 80 до 100 °С. В предварительных опытах проверялась готовность аппарата с обвязкой к испытаниям и влияние первичной порции формалина на начало реакции.

В количественных опытах первичные дозы формалина не вносились, но следует отметить, что во всех этих опытах реакция начиналась также практически мгновенно – индукционный период не превышает 1 мин.

В количественных опытах раствор в реакторе сначала нагревали до 80 °С, после чего перистальтическим насосом начинали подавать к нему формалин с заданной скоростью. В течение времени от получаса до часа раствор нагревался до нужных рабочих температур (от 80 до 100 °С), и реакция выходила на экзотермический режим. Для поддержания достигнутой температуры поочередно отключались нагревающие устройства, и в дальнейшем температура поддерживалась регулировкой потока охлаждающей воды [4].

Рисунок [4] довольно однозначно указывает на приемлемость температурного коридора от 80 до 100 °С для проведения процесса окислительного разрушения аммония. Таким образом, регулируя скорость подачи формалина, нужно будет вести процесс в интервале температур (90±10) °С. Наличие столь широкого температурного коридора значительно облегчает контроль за процессом.

Первую экономию энергозатрат можно получить, нагревая исходный раствор с аппаратом не до 90 °С, а до 60. После 60 °С внешний нагрев можно будет отключить, а раствор подогреть внесением значительной первичной порции формалина. Реакция при этом начнется практически сразу именно из-за внесения большой иницирующей порции.



Разложение аммония при температурах 85 и 100 °С и скорости подачи формалина 1 л/ч:  
1 – азотная кислота при 85 °С; 2 – нитрат аммония при 85 °С;  
3 – азотная кислота при 100 °С; 4 – нитрат аммония при 100 °С

Тогда на нагреве от 60 до 90 °С можно сэкономить  $30C_{\text{апп}}$  кДж тепла, где  $C_{\text{апп}}$  – условная теплоемкость аппарата с раствором, равная примерно сумме теплоемкостей самого аппарата и теплоемкости 20 л исходного раствора.

Теплоемкость самого аппарата составит  $460 \cdot 80 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \approx 37 \text{ кДж} \cdot \text{К}^{-1}$ , где 460 – это удельная теплоемкость стали, из которой изготовлен аппарат,  $\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1}$ ; а 80 – это вес аппарата, кг. Теплоемкость раствора можно грубо оценить как  $20 \text{ кг} \cdot 4,2 \text{ кДж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{кг}^{-1} \approx 84 \text{ кДж} \cdot \text{К}^{-1}$ . Чтобы поднять температуру от 60 до 90 °С, потребуется:  $30 \cdot (37 + 84) = 3630 \text{ кДж}$  тепла. Это тепло можно получить, добавив  $12,1 \cdot (3630/300)$  моля формальдегида. Это количество формальдегида содержится в 0,9 л формалина (крепость формалина составила 13,5 моль/л). Такой объем формалина можно будет внести в бак-реактор двумя последовательными порциями, так как объем разовой порции, больший 0,5 л, не рекомендуется по регламенту. При загрузке бака на 60 % экономия тепла составит  $30 \cdot (37 + 168) = 6150 \text{ кДж}$ .

Еще большую (основную) экономию можно получить, если дальше продолжать процесс в самоподдерживающемся режиме, когда не придется ни подогреть раствор, ни охлаждать его проточной водой. Так, нами экспериментально определена скорость остывания аппарата с 100 по 80 °С после завершения процесса. В среднем она составляет  $20/68 \approx 0,3 \text{ °С/мин}$ . Чтобы сохранить тепловой баланс, нужно дозировать формалин с интенсивностью, позволяющей нагревать аппарат с раствором с такой же скоростью. Эту скорость можно оценить приближенно по формуле:

$$\nu = 0,3 \text{ К} \cdot \text{мин}^{-1} \cdot 60 \text{ мин} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot (37 + 84) \text{ кДж} \cdot \text{К}^{-1} / 300 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1} / 13,5 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1} \approx 0,54 \text{ л/ч.}$$

Весь процесс, таким образом, укладывается в одну рабочую смену и позволяет сэкономить (см. рис.):  $\sim 50 \text{ молей} \cdot 300 \text{ кДж/моль} = 15000 \text{ кДж}$  тепла (энергии) за один эксперимент (этим количеством тепла можно нагреть от комнатной температуры до  $100^\circ\text{C}$  около 45 л воды).

Авторы выражают благодарность Н. Г. Фирсину, старшему научному сотруднику Радиевого института им. В. Г. Хлопина, за основные идеи и помощь в написании данной статьи.

#### Список литературы

1. Способ окислительного разрушения солей аммония : пат. 2329554 РФ. МПК G21F / Бартенев С. А., Зильберман Б. Я., Есимантовский В. М., Фирсин Н. Г., Стрелков С. А., Быховский Д. Н., Логунов М. В., Машкин А. Н., Корченкин К. К. Опубл. 2008; Бюл. № 20.
2. Ионы аммония. Титриметрический метод определения в технологических продуктах. СТП 70.22-90.
3. ГОСТ 1625-89. Определение массовой доли формальдегида. Введ. 1990-01-01. М. : Издательство стандартов, 1989. 18 с.
4. Испытания бака-реактора для разрушения солей аммония на выпарном стенде СвердловНИИхиммаш / Звонков И. Н., Костромин К. В., Ряпосов А. В., Демин Д. В., Блажева И. В., Фирсин Н. Г., Хомяков А. П. // Труды СвердловНИИхиммаш. Екатеринбург, 2014. С. 86

УДК 62-42

Санникова Д. Д., Некрасов И. И.  
Уральский федеральный университет,  
bogolyubovadd@mail.ru

## ПРОИЗВОДСТВО ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АГРЕГАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ПРОКАТНОГО И ТРУБОЭЛЕКТРОСВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В настоящее время широкое распространение получили абсорбционные холодильные агрегаты, в конструкциях которых используют трубы с оребренной поверхностью различных видов. Примером таких агрегатов являются чиллеры, которые применяются в системах кондиционирования зданий. Система чиллер-фанкойл является сегодня одним из самых экономически эффективных и востребованных решений в организации центральных многозональных систем кондиционирования [1].

Изготовление труб с внутренним оребрением, применяемых в качестве испарителей абсорбционных холодильных агрегатов, наталкивается на проблемы процесса нанесения ребер на их внутреннюю поверхность (рис. 1).



На кафедре «Металлургические и роторные машины» УрФУ ведутся работы по созданию оборудования, инструмента и технологий для получения труб с внутренним кольцевым оребрением [2].

В основе одной из предлагаемых технологий лежит использование существующего прокатного оборудования для нанесения оребрения на полосу, с последующей ее сваркой в линии трубозлектросварочного агрегата (рис. 2).

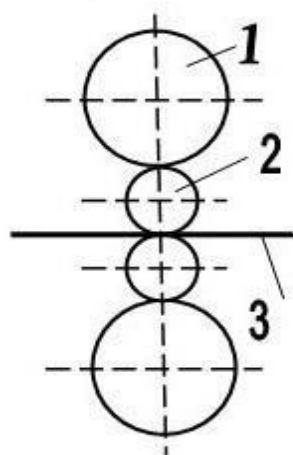


Рис. 1. Узел клетки кварто:  
1 – опорный валок; 2 – рабочий валок;  
3 – прокатная полоса

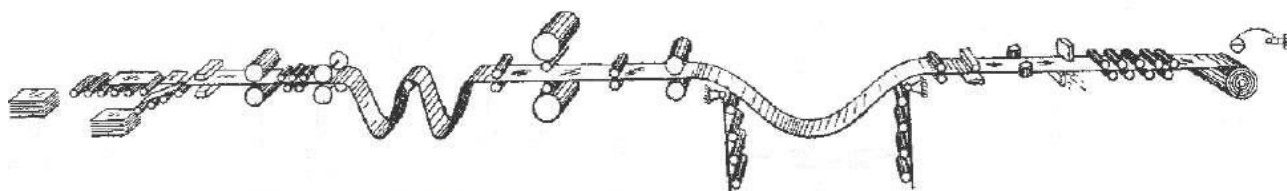


Рис. 2. Схема трубозлектросварочного агрегата

Имеющиеся в промышленности реверсивные прокатные станы кварто, широко применяемые для холодной прокатки полос, не позволяют исключить контакт между опорным и рабочим валком с нарезанной профилирующей частью, что ведет к повышенному износу поверхности опорного валка и неустойчивому ведению процесса прокатки (рис. 3).

Следует заметить, что при нанесении оребрения на полосу с параметрами, соответствующими параметрам ребер внутренней поверхности труб испарителей  $P_{пр} > P_{гл}$ , где  $P_{гл}$  – усилие при прокатке на гладкой бочке,  $P_{пр}$  – усилие прокатки с применением профильного валка.

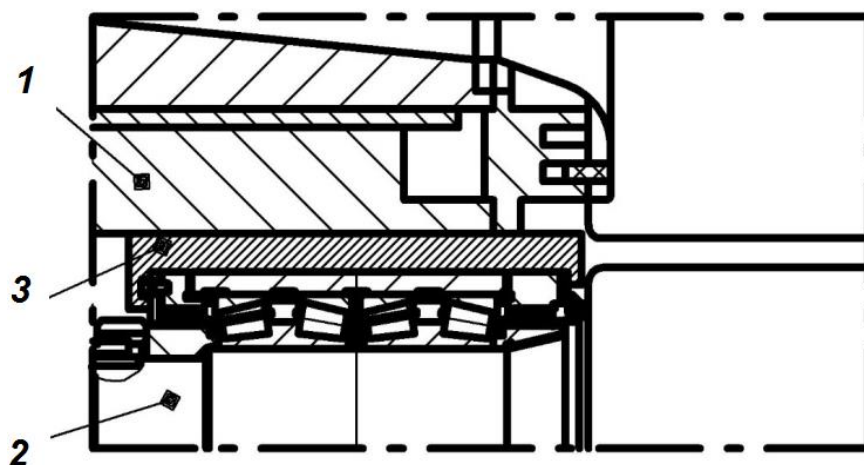


Рис. 3. Валковый узел кварто:  
1 – подушка опорного валка; 2 – подушка рабочего валка;  
3 – прокатка

Обжатия при нанесении оребрения не превышают 20 %, ширина полосы 70 мм, материал полосы – сталь 08, сталь 10. Поэтому в целях обеспечения минимальных затрат на реконструкцию оборудования и изменение технологии предлагается установить дополнительный элемент конструкции (проставку) между подушками рабочего и опорного валков. Исключение при этом опорных валков от восприятия вертикального усилия прокатки, как показывает предварительная оценка, позволит обеспечить необходимое качество получаемых оребренных полос при сохранении работоспособности остальных элементов конструкции рабочей клетки.

#### Список литературы

1. Чиллеры Саньо [Электронный ресурс]. URL: <http://panasonic.net/sanyo/index.html> (дата обращения 18.09.2014).
2. Разработка технологии и оборудования для изготовления труб с внутренним оребрением [Текст] / В. С. Паршин, И. И. Некрасов, А. П. Карамышев и С. М. Газман // Сталь. 1994. № 4. С. 51–53.

УДК 621.313.333

Сафин Н. Р., Прахт В. А., Дмитриевский В. А., Дмитриевский А. А., Смольянов И. А.  
Уральский федеральный университет,  
[emf2010@mail.ru](mailto:emf2010@mail.ru)

### **МОНИТОРИНГ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ТОКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДИКИ ВЕКТОРОВ ПАРКА И ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗА В ЦЕЛЯХ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Асинхронные двигатели (АД) являются наиболее массовой продукцией электромашиностроения. Авторы ряда работ отмечают, что износ подшипников является причиной около 40 % выхода из строя АД [1; 2]. В литературе описывают различные методы токовой диагностики. Ряд авторов [2] отмечают, что дефекты подшипников качения сложно обнаружить по току АД. Одной из причин является наличие доминирующей составляющей тока с частотой сети, превышающей в несколько раз составляющие, вызванных дефектами определенного рода. В других работах [3; 4] имеются сведения, подтверждающие возможность токовой диагностики дефектов подшипника.

Для рассмотрения вопроса о возможности идентификации повреждений подшипников по току статора были проведены испытания АД при работе с различными подшипниками и исследованы полученные данные.

Впервые метод векторов Парка для диагностики различных неисправностей АД, таких как нарушение изоляции обмотки статора, эксцентриситет воздушного зазора, обрыв стержней ротора и т. д., были проанализированы А. J. Marques Cardoso и E. S. Saraiva в 1993 г. [3]. Приведем описание алгоритма токовой диагностики на основе метода Парка. В первую очередь производят

запись токов в каждой фазе АД. Далее, по фазным токам вычисляют вектор Парка в разные моменты времени и его модуль [3–4]:

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} i_a - \frac{1}{\sqrt{6}} i_b - \frac{1}{\sqrt{6}} i_c. \quad (1)$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}} i_b - \frac{1}{\sqrt{2}} i_c. \quad (2)$$

$$PI = |i_d + j \cdot i_q|^2 = \sqrt{(i_d t)^2 + (i_q t)^2}. \quad (3)$$

Длина вектора Парка подвергается фурье-преобразованию.

В спектре длин векторов Парка частоты, определяющие неисправности подшипников, выражаются следующим соотношением [4]:

$$f_{EPVA} = k \cdot f_{i,o}, \quad (4)$$

где  $k = 1, 2, 3, \dots$  (целые числа);  $f_{i,o}$  – одна из частот колебаний подшипников, которые могут быть вычислены по следующим формулам, Гц [4]:

– при дефекте во внутренней обойме

$$f_i = \frac{n}{2} \cdot f_P \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right), \quad (5)$$

– при дефекте во внешней обойме

$$f_o = \frac{n}{2} \cdot f_P \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right), \quad (6)$$

где  $n = 8$  – число тел качений подшипника, шт.;  $f_{Pu} = 45,75$  – частота вращения ротора в номинальном режиме, Гц;  $d = 7,94$  – диаметр тела качения, мм;  $D = 33,5$  – диаметр делительной окружности, мм;  $\alpha$  – номинальный угол контакта подшипника (условно  $0^\circ$ ).

Рассчитанные числовые значения характерных частот с использованием формул (5)–(6) занесены ниже в таблицу.

Числовые значения частот определяющих дефект подшипника

Вид дефекта подшипника	Частоты $f_i$ и $f_o$ , Гц	Частоты $f_{EPVA}$ , Гц		
		$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
Во внешней обойме	139,6	139,6	279,2	418,8
Во внутренней обойме	226,4	226,4	452,8	679,2

В качестве испытуемого АД был использован АИР 71А2У2 (0,75 кВт; 2820 об/мин), в котором используются подшипники марки 6204 (рис. 1, а, б). Испытания проводились (рис. 1, а и б): с исправным подшипником и с подшипниками, имеющими отверстия по внешним обоймам 4 мм (поврежденный № 1) и 6 мм (поврежденный № 2). В двух последних случаях также имелись небольшие выемки во внутренних обоймах подшипников. Данные способы искус-

ственного получения дефектов для анализа режимов работы АД с поврежденными подшипниками отмечаются в работе [6; 8].

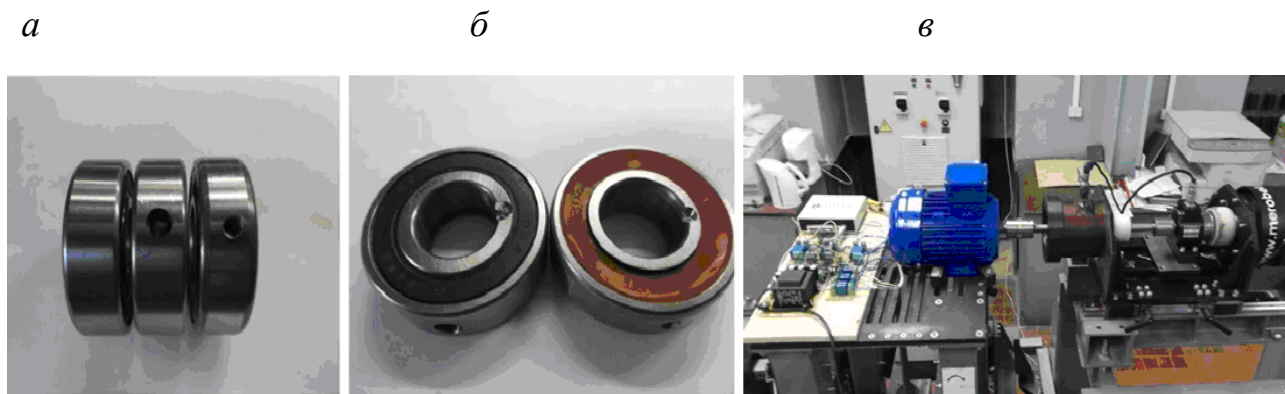


Рис. 1. Подшипники и испытательный стенд:  
*а* – исправный, поврежденные № 2 и 1;  
*б* – поврежденные подшипники вид сбоку, *в* – испытательный стенд

Испытания проводились на стенде (рис. 1, *в*), при этом нагрузочный момент создавался электромагнитным порошковым тормозом «MetrobelFAT 350» 35 Н·м, 3000 об/мин. Для измерений использовались: датчик момента TRD-3K (3 кгс·м), датчик частоты вращения МР-981. Для сопоставимости результатов значения нагрузочных номинальных моментов задавались равными ( $M_H = 2,5$  Н·м). Запись значений токов и напряжений на компьютер выполнялась с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) (USB3000) с частотой дискретизации 3 кГц и измерительной платы с тремя датчиками токов LEMHX 02-P и тремя датчиками напряжений LV25-PSP5. Далее мгновенные значения токов обрабатывались в пакете Matlab для построения спектрограмм.

Рассмотрим кривые Лиссажу векторов токов Парка (рис. 2, *а*, *б*, *в*), построенные с помощью формул (1)–(2).

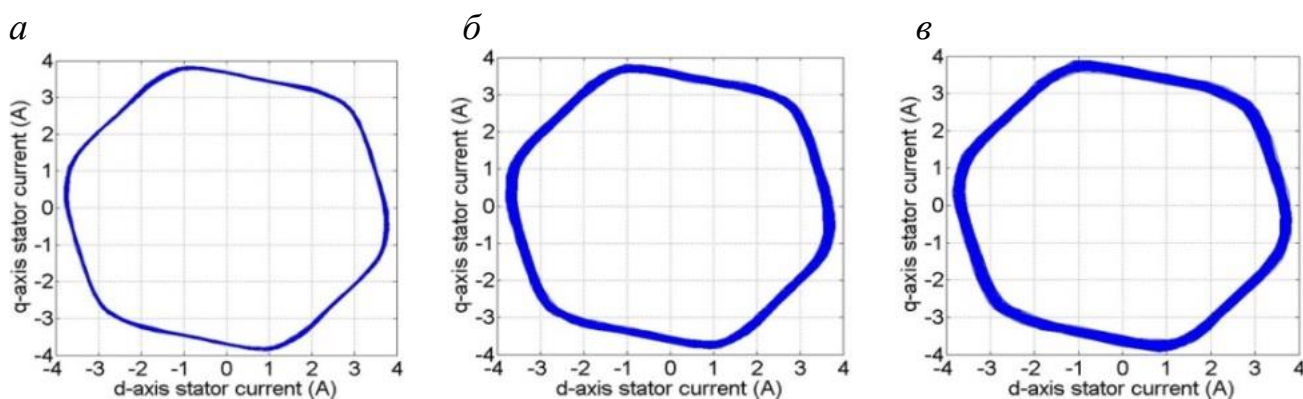


Рис. 2. Токи статора АД по кривым Лиссажу:  
*а* – при работе с исправным подшипником; *б* – с поврежденным подшипником № 1;  
*в* – с поврежденным подшипником № 2

Отметим, что при работе АД с поврежденными подшипниками толщина кривых Лиссажу получилась шире, чем при испытаниях с исправным подшипни-

ком. При этом надо учитывать, что утолщение кривых Лиссажу мало говорит о типе неисправности и его местонахождении. Так как существуют следующие факторы: неполная синусоидальность напряжения питания – коэффициент нелинейного искажения в данной работе был равен  $K_U = 1,95 \%$ , наличие изначального уровня эксцентриситета (до 10 % допуск) заводом-изготовителем и т.д. В связи с этим для точного определения наличия неисправности подшипников выполняют построения спектрограмм (рис. 3).

Рассмотрим спектрограмму токов статора при работе с исправным и неисправным подшипником № 1 (рис. 3), на которой отмечены характерные частоты, соответствующие определенным повреждениям.

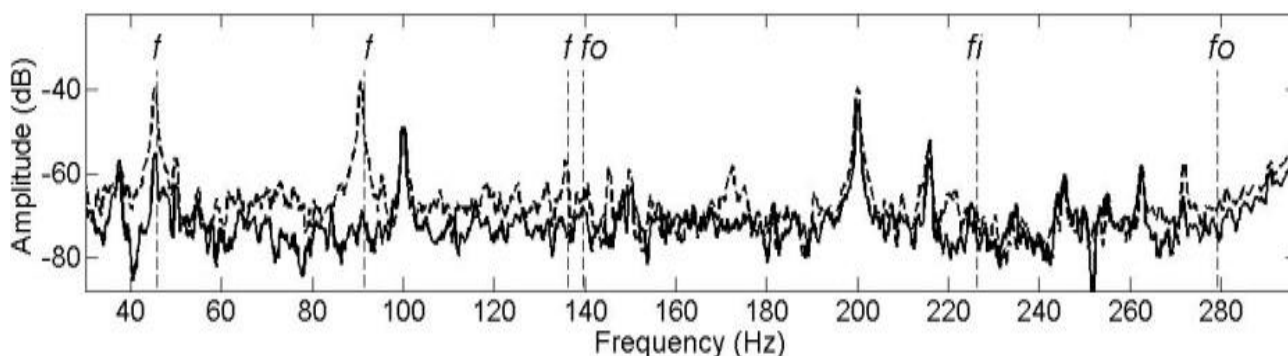


Рис. 3. Спектрограмма токов АД при работе с исправным (сплошная линия) и неисправным подшипником № 1 (штрихпунктирная линия)

В исследуемом диапазоне выделяют: две частоты ( $f_o$ ), определяющие дефект во внешней обойме подшипника, одну частоту ( $f_i$ ), которая должна указывать на наличие дефекта во внутренней обойме подшипника. Можно заключить (см. рис. 3), что среди частот ( $f_i$ ) и ( $f_o$ ) определяющих дефект подшипника, выделяется частота ( $f_o$ ), равная 139,6 Гц. Вместе с тем на приведенных спектрограммах отмечены характерные частоты, кратные частоте  $f$  вращения ротора АД, на уровнях 45,75 Гц, 91,5 Гц и 137,25 Гц, возникающие при работе с неисправным подшипником. Как было приведено ранее, частота вращения ротора  $f_r$  при номинальном режиме равнялась 45,75 Гц.

Ряд авторов также отмечают [6; 7], что для нестационарных сигналов, которые чаще всего состоят из кратковременных высокочастотных и длительных низкочастотных компонентов, целесообразно применять вейвлет анализ, при котором обеспечиваются узкие окна для высоких частот и широкие окна для низких частот.

Нами был использован этот метод. Мгновенные значения токов, полученные на стенде (см. рис. 1, в), обрабатывались в пакете Matlab для проведения вейвлет анализа.

В качестве материнского вейвлета, как одного из используемых [6; 8], был применен вейвлет Добеши. Рассмотрим приведенные на рис. 4 и 5 графики.



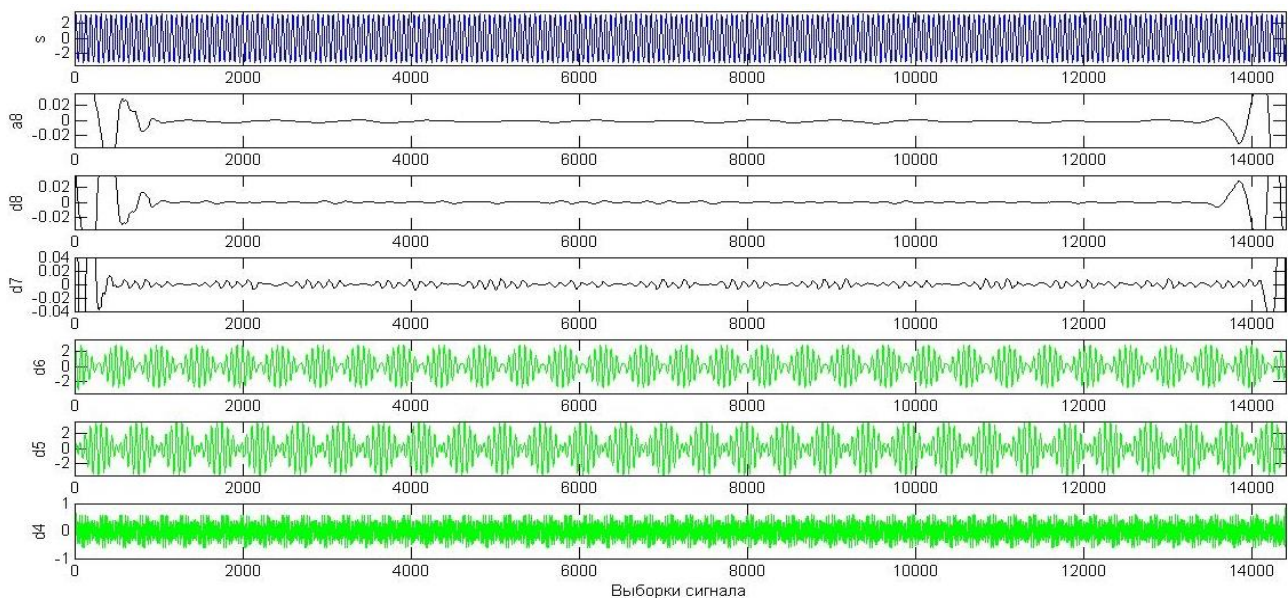


Рис. 4. Разложение вейвлета Добеши № 4 до 8-го уровня – тока статора при работе с исправным подшипником

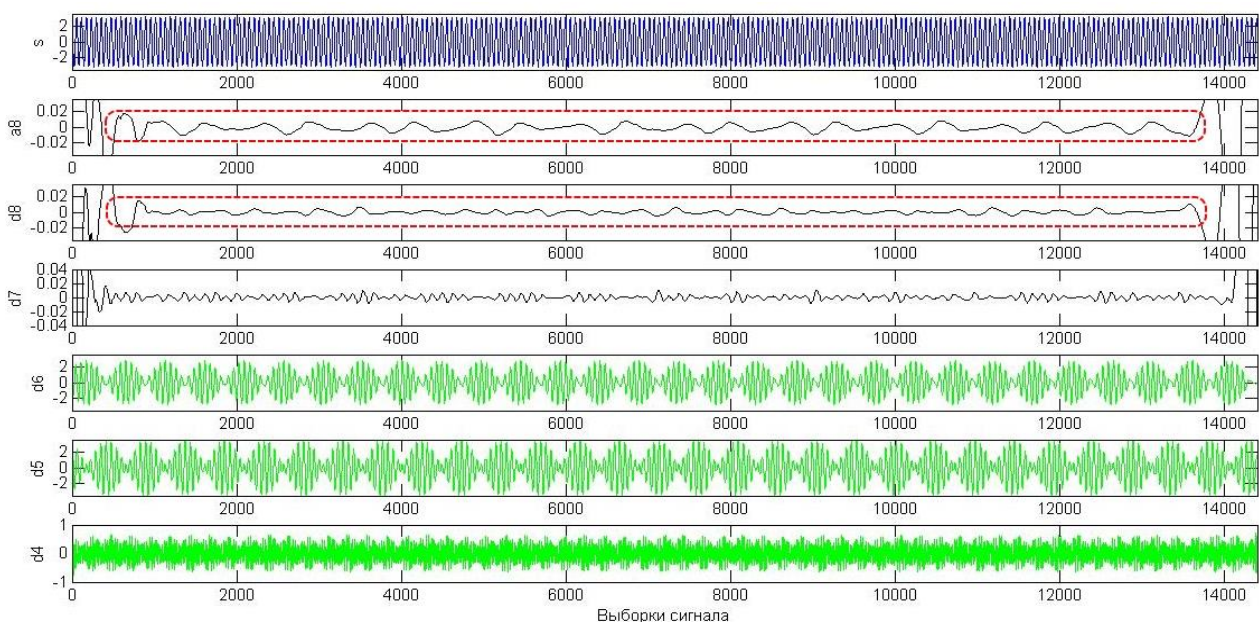


Рис. 5. Разложение вейвлета Добеши № 4 до 8-го уровня – тока статора при работе с поврежденным подшипником № 1

Сопоставив выходные графики коэффициентов аппроксимации  $a_8$  и детализации  $d_8$ , заметим, что при работе АД с неисправным подшипником № 1 (см. рис. 5) имеется увеличение уровня амплитуд коэффициентов  $a_8$  и  $d_8$ .

При повторных испытаниях с неисправным подшипником № 2 полученные выходные данные вейвлет-коэффициентов получились подобными вышеприведенному графику (см. рис. 5). Следовательно, при работах АД с неисправными подшипниками можно наблюдать рост амплитудных колебаний и увеличение определенных вейвлет-коэффициентов.

Таким образом, одной из основополагающих идей вейвлет-представления сигналов является разбивка приближения к сигналу на две составляющие – аппроксимирующую и детализирующую, с последующим их дроблением с целью изменить уровень декомпозиции сигнала.

В нашем случае значение коэффициента полезного действия (КПД) для АД с исправным подшипником составило  $\eta_1 = 0,625$ . При испытаниях с поврежденными подшипниками значения составили  $\eta_2 = 0,61$  (с поврежденным подшипником № 1) и  $\eta_3 = 0,62$  (с поврежденным подшипником № 2). Следовательно, в результате повреждения подшипника КПД электродвигателя снизился на 2,4 и 1,6 % соответственно для двух описанных выше случаев. Как правило, основными причинами выхода из строя подшипников могут быть запыленность воздуха, неблагоприятные климатические условия, частые перегрузки, ненадлежащий монтаж, агрессивная среда и т.д.

Можно отметить, что дефекты подшипников по току статора можно обнаружить методом векторов Парка, для детального мониторинга и диагностики требуется построение спектрограмм. Необходимость заблаговременного выявления и мониторинга неисправностей АД напрямую связана с обеспечением безопасной и экономичной эксплуатации промышленных установок и технологических комплексов.

Токовая диагностика АД, с помощью которой можно заблаговременно выявлять неисправности, в частности неисправности подшипников, дает возможности заранее планировать ремонтно-технологические работы, снизить перерасход электроэнергии, также улучшить технологию и повысить рентабельность производства.

#### Список литературы

1. Jafar Zarei, Javad Poshtan. An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection // Tribology International. 2009. Vol. 42. P. 213–219.
2. Onel I. Y., Dalci K. B., Senol I. Detection of outer raceway bearing defects in small induction motors using stator current analysis // Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences. 2005. Vol. 30 (6). P. 713–722.
3. Induction Motors – Modelling and Control // Edited by Prof. Rui Esteves Araújo. Rijeka : InTech. 2012. P. 558 .
4. Jose L. H. Silva A. J., Marques Cardoso. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach // IEEE. 2005. P. 2591–2596.
5. Levent Eren. Bearing damage detection via wavelet packet decomposition of stator current // PhD thesis. 2002. P. 116.
6. DWT analysis of numerical and experimental data for the diagnosis of dynamic eccentricities in induction motors / J. Antonino-Daviu, P. Jover, M. Riera, A. Arkkio, J. Roger-Folch // Mechanical Systems and Signal Processing. 2007. № 21. P. 2575–2589.
7. Ruqiang Yan, Robert X. Gao, Xuefeng Chen. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines : A review with applications // Signal Processing. 2014. № 96. P. 1–15.
8. Discrete Wavelet Transforms-Theory and Applications / Edited by Juuso Olkkonen. Rijeka : InTech, 2011. P. 268.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ КАПИТАЛЬНЫХ РЕМОНТАХ ЗДАНИЙ

Более 60 % многоквартирных домов (МКД) характеризуются степенью износа более 30 %, а средний износ основных фондов в ЖКХ составляет порядка 40 %. При этом актуальным вопросом остается снижение потребления энергии и воды в зданиях.

Среди зданий, требующих модернизации, особо выделяются здания учреждений бюджетной сферы и многоквартирные дома. Бюджеты выделяют определенные средства на ремонт, новое законодательство создает условия для аккумуляции на эти цели средств жителей МКД. Однако на объектах нет понимания, как потратить выделяемые средства наиболее эффективно. Была поставлена задача, которая решалась в рамках научно-исследовательской работы по заказу Минэнерго России коллективом авторов: вооружить собственников жилья, главных распорядителей бюджетных средств, руководителей бюджетных учреждений, органы местного самоуправления и органы исполнительной власти регионального уровня рядом методик, которые бы позволили повысить энергетическую эффективность зданий в результате капремонта.

Вопрос настолько актуален, что в настоящее время собраны и обобщаются несколько работ в этом направлении [1–9]. Результаты исследования использованы ГК «Фонд содействия реформированию ЖКХ» в методическом сборнике, разработанном в ноябре 2014 г. и рекомендуемом регионам к использованию. Представляется, что в любом случае придется разрешить ряд противоречий:

– *Пользователи или специалисты.* Возможно ли, чтобы пользователи смогли быстро, дешево и самостоятельно принять квалифицированное решение по составу мероприятий энергоэффективного капитального ремонта? Или все же надо привлекать профессионалов, например, энергоаудиторов?

– *Обобщения или точность.* Любая типологизация и обобщение сложны тем, что очень много различий – климатических, условий эксплуатации, конструкций и типа зданий, степени износа. Много конкретной специфической информации – сложно воспринять, мало – не учитывает всего разнообразия и приводит к погрешностям.

– *Четкая методика или ликбез.* Мало пока среди пользователей информированности и понимания вопроса, т. е. любую подобную методику надо начинать с объяснений.



Итоговый перечень результатов работы представлен в нижеприведенной таблице.

Блоки	Важнейшие результаты работы
Диагностика	Методика выявления резервов реконструируемых зданий для подбора ключевых мероприятий капитального ремонта (многоквартирные дома и отдельно 6 отраслей бюджетной сферы)
Мероприятия	Перечень типовых мероприятий энергосбережения и повышения энергетической эффективности в многоквартирных домах и в зданиях объектов бюджетной сферы (около 85 позиций, со ссылками, эффектами)
	Минимальный перечень наиболее эффективных мероприятий для многоквартирных зданий, отдельно – для зданий ОБС, с указанием источников потерь, с обоснованием выбора, примерным расчетом эффекта, обозначением косвенных эффектов и механизмами внедрения, с подробным примером по светопрозрачным конструкциям
	Перечень-матрица мероприятий по энергосбережению в зданиях с сопутствующими комплементарными мерами для повышения интегральной эффективности капремонтов
Анализ	Анализ зарубежного опыта проведения капитальных ремонтов и реконструкции зданий, приоритеты, меры политики, показатели эффективности, примеры
	Сравнение российских и зарубежных нормативных требований энергоэффективности зданий
Оценка и мониторинг	Методика интегральной технико-экономической оценки эффективности проведения мероприятий по капитальному ремонту зданий
	Организационно-техническая система мониторинга эффективности проведения мероприятий капитального ремонта (цели, задачи, функции, набор организационных мер)
Внедрение	Проект НПА для регионов по утверждению минимально необходимого перечня мер по энергоэффективности в составе капитального ремонта
Перспектива	Архитектура технической системы мониторинга энергопотребления после проведенного капитального ремонта
	План первоочередных мероприятий – «дорожная карта» по повышению эффективности выполняемых мероприятий по энергосбережению в составе капитального ремонта зданий, с предложениями поправок в действующие НПА
	Структура и задачи нового комплексного СНиП «Энергоэффективность зданий и сооружений»

Методика выявления резервов позволяет на основе исходных данных, выявленных особенностей ограждений, инженерных систем здания, показаний приборов учета и анализа расходов на ТЭР по договорам и счетам сделать выводы о степени соответствия расчетных и фактических параметров, эффективности энергопотребляющих систем, чтобы затем выбрать энергосберегающие мероприятия.

В Перечне типовых мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в МКД и в зданиях бюджетной сферы приводится полный список классифицированных мероприятий: содержание мероприятия, ограничения и оговорки для его реализации, указан уровень затратности, ожидаемый процент экономии, приведены конкретные примеры из отечествен-

ной и зарубежной практики. Выделены группы мероприятий для экономии тепловой энергии (повышение теплозащиты отдельных элементов контура здания, снижение теплопотерь в местах общего пользования, повышение энергоэффективности систем вентиляции, отопления и ГВС); экономии электрической энергии (системы освещения придомовой территории, МОП, инженерное оборудование здания); экономии воды; природного и сжиженного газа; общестроительные инновации, использование вторичных энергоресурсов и возобновляемых источников энергии.

Отдельно составлен минимальный перечень работ, содержащий следующие группы мероприятий: утепление контура здания, в т. ч. стен, чердаков и кровель, замена окон; установка приборов учета и средств регулирования потребления, установка ИТП, замена светильников на люминесцентные и светодиодные.

Поскольку здание – это единая система, был сформирован перечень-матрица взаимоувязанных и дополняющих мер. Например, для замены окон дополняющими являются адаптация системы отопления к меняющейся тепловой нагрузке; промывка системы отопления; наладка и балансировка системы отопления; установка малоинерционных отопительных приборов, снабженных автоматическими терморегуляторами; замена однотрубной системы отопления на двухтрубную; установка приборов учета тепловой энергии.

Для подкрепления выбора технических решений экономическими аргументами сформирована методика технико-экономического обоснования мероприятий. Вся предварительная работа и полученные результаты позволили предложить интегральный комплексный документ – план первоочередных мероприятий – «дорожную карту», содержащий в том числе предложения поправок в действующие нормативно-правовые акты. Так, в ближайшие два года предлагается сформировать минимальный перечень первоочередных работ и включить его в планы проведения капремонта на уровне регионов; включить в перечень критериев определения очередности проведения капитального ремонта в МКД обязательный критерий «уровень энергопотребления»; соответствующим образом изменить условия предоставления субсидий региональным бюджетам на реализацию региональных программ в области энергосбережения и программ капитального ремонта общего имущества в многоквартирных домах.

В части совершенствования НПА предложено разработать свод правил (СП) «Энергоэффективность зданий, строений, сооружений» (наименование рабочее), а также ввести обязательность разработки проектной документации при проведении капремонта в рамках региональных программ; включить в действующие СП ужесточающиеся требования по результатам повышения энергоэффективности после капремонта.

#### Список литературы

1. Анализ лучшей практики финансирования капитального ремонта и повышения энергоэффективности многоквартирных домов (на примере стран Центральной и Восточной Европы). М. : Международная финансовая корпорация (IFC), 2011. 146 с.

2. Использование технологий пассивных домов при модернизации старых зданий: сборник документов № 24. Дармштадт : Институт по изучению пассивных домов, 2003. 267 с.
3. Капитальный ремонт в многоквартирных домах: вопросы и ответы. Комментарии и разъяснения экспертов государственной корпорации / Фонд содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства. М. : Библиотечка РГ, 2014. 80 с.
4. Малявина Е. Г. Теплотери здания : справочное пособие. М. : АВОК-ПРЕСС, 2007. 235 с.
5. Институциональные проблемы повышения энергоэффективности жилищного и бюджетного секторов / С. Б. Сиваев [и др.]. М. : Фонд «Институт экономики города», 2010. 100 с.
6. Современные аспекты энергоэффективности в России // Пособие для региональных органов власти. М. : ПРООН ГЭФ, 2011. 51 с.
7. Финансирование капитального ремонта и повышения энергоэффективности многоквартирных жилых домов в России. Основные выводы и рекомендации. М. : Международная финансовая корпорация : Европейский банк реконструкции и развития, 2012. 34 с.
8. Cost optimal building performance requirements. European Climate Foundation (ECF). / T. Boermans, K. Bettgenhduser, A. Hermelink, S. Schimschar. 2 May 2011. 38 p.
9. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 On The Energy Performance Of Buildings // Official Journal of the European Union. 18.6.2010. L 153/13. 23 p.

УДК 621.577

Суранов М. В., Ташлыков О. Л.  
Уральский федеральный университет,  
Maksim.Suranov@mail.ru

## **СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ**

Проблема утилизации сбросной низкопотенциальной теплоты присутствует на многих предприятиях. Значительное количество теплоты сбрасывается в окружающую среду на тепловых и атомных электростанциях, хотя она может быть использована для нужд предприятия. Кроме того, утилизация сбрасываемой теплоты важна с экологической точки зрения, так как может снизить тепловое загрязнение окружающей среды. Одним из способов утилизации низкопотенциальной теплоты является использование тепловых насосов.

Тепловые насосы (теплонасосные установки) позволяют нагревать воду для отопления и горячего водоснабжения путем отбора теплоты из окружающей среды или от низкотемпературных бытовых и промышленных отходов.

Преимущество применения теплонасосных установок в системах теплоснабжения по сравнению с другими способами теплоснабжения состоит в значительной экономии затрат энергии.

Рассмотрим пример по использованию тепловых насосов на АЭС с реактором БН-600 [1]. В качестве низкопотенциальных источников теплоты можно применять воду или воздух, используемые для охлаждения различного оборудования.

Сравним эффективность использования тепловых насосов для таких низкопотенциальных источников теплоты, как вода системы охлаждения масла турбины, системы охлаждения масла питательного электронасоса и воздух системы охлаждения шахты реактора. В качестве критерия сравнения рассмотрим [2]:

– коэффициент преобразования теплоты  $\mu = \frac{q_k}{I_{сж}}$ , где  $q_k$  – теплота, переданная высокопотенциальному теплоносителю;  $I_{сж}$  – работа, затрачиваемая на сжатие;

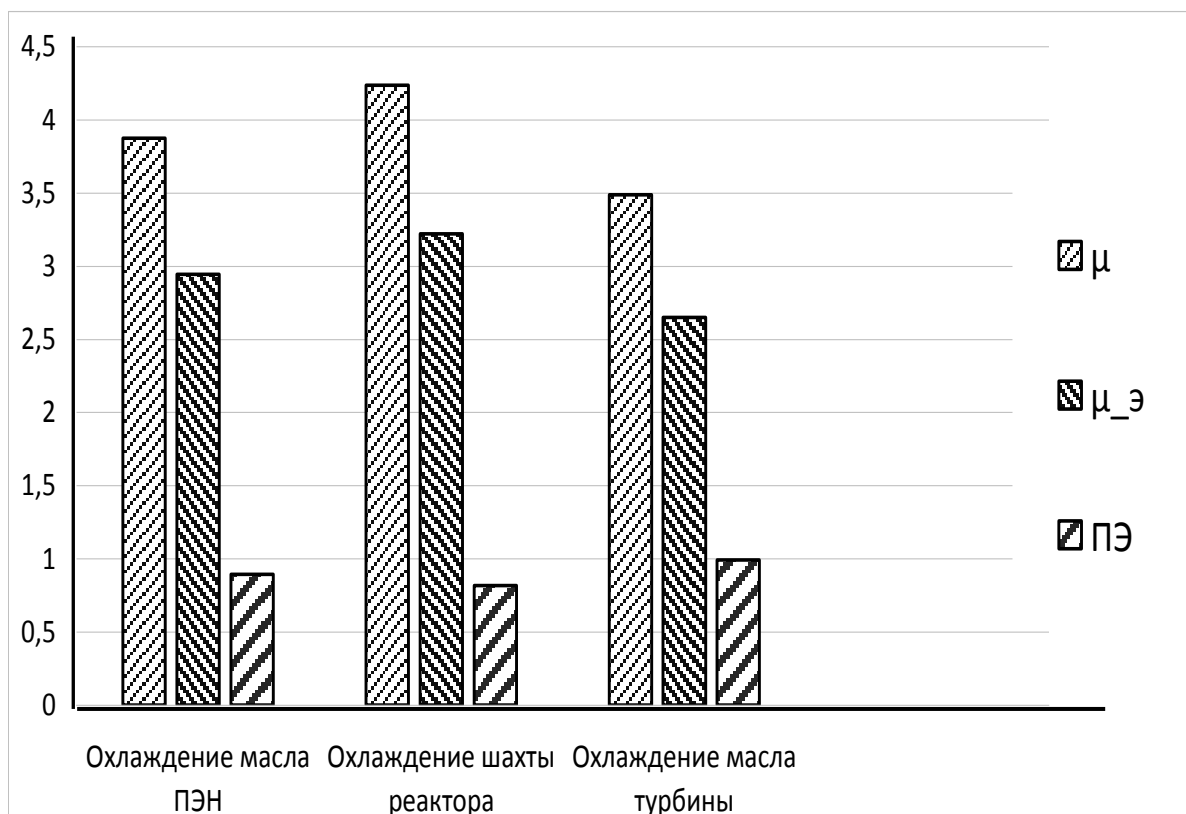
– коэффициент преобразования электроэнергии  $\mu_э = \eta_{эм} \eta_э \mu$ , где  $\eta_{эм}$  – электромеханический КПД компрессора;  $\eta_э$  – КПД электродвигателя;

– удельные затраты первичной энергии на производство теплоты, где  $\eta_{эс}$  – КПД электростанции;  $\eta_{пер}$  – КПД систем энергоснабжения.

Для эффективной работы насоса с электроприводом должны выполняться условия  $\mu_э > 1$  или ПЭ < 1. Если эти величины равны единице, то теплота, вырабатываемая тепловым насосом, становится равной теплоте, полученной при прямом использовании электроэнергии на обогрев, и применение теплового насоса теряет смысл.

Для эффективной работы насоса с электроприводом должны выполняться условия  $\mu_э > 1$  или ПЭ < 1. Если эти величины равны единице, то теплота, вырабатываемая тепловым насосом, становится равной теплоте, полученной при прямом использовании электроэнергии на обогрев, и применение теплового насоса теряет смысл.

Результаты расчета коэффициентов приведены в виде графика, представленного на рисунке.



Сравнение коэффициентов эффективности работы теплового насоса для разных низкопотенциальных источников теплоты

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент ПЭ при использовании теплового насоса для воды системы охлаждения масла турбины равен единице. Поэтому использование данного источника теплоты нецелесообразно.

2. Значения критериев работы теплового насоса для воздуха, охлаждающего шахту реактора, показывают, что использование этого источника эффективнее, чем воды, охлаждающей масло питательного электронасоса. Однако теплофизические свойства воздуха значительно уступают воде, поэтому использовать воду, охлаждающую масло ПЭН, в качестве низкопотенциального источника теплоты для теплового насоса предпочтительнее.

#### Список литературы

1. Ташлыков О. Л., Ковин И. В., Кокорин В. В. Утилизация низкопотенциальной теплоты АЭС с реактором на быстрых нейтронах с использованием теплового насоса // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 3. С. 22–25.
2. Трубаев П. А., Гришко Б. М. Тепловые насосы: учеб. пособие. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2009. 142 с.

УДК 699.86

Сыгурова М. В., Бакрунова Т. С.  
Самарский государственный технический университет,  
sygurovam@mail.ru

## ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ КАК ЭЛЕМЕНТ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ

Являясь одной из ведущих держав мира по производству энергии, Россия значительно уступает экономически развитым странам в вопросах рационального использования энергоресурсов. Всего на 1 квадратном метре жилья в год в нашей стране теряется порядка 600 Гкал условного топлива. Энергосбережение становится требованием времени, что определяет важность извечной проблемы выбора теплоизоляционных материалов. Очевидно, что универсальных утеплителей в принципе не существует. У каждого из них есть свои достоинства и недостатки, ограничивающие области их применения. Анализ опыта различных стран в решении проблемы энергосбережения показывает, что одним из наиболее эффективных путей ее решения является сокращение потерь тепла через ограждающие конструкции зданий, сооружений, промышленного оборудования, тепловых сетей.

Основным видом применяемых в России утеплителей являются минераловатные изделия, доля которых составляет более 65 %, около 8 % приходится на стекловатные, около 20 % – на пенополистирол и другие пенопласты. Доля теплоизоляционных ячеистых бетонов в общем объеме теплоизоляционных материалов не превышает 3 %, вспученного перлита, вермикулита и изделий на их основе – 0,4...0,6 %. Структура объемов выпуска утеплителей в России мало

отличается от сложившейся в развитых странах, где волокнистые утеплители также занимают 60–80 % от общего выпуска теплоизоляционных материалов.

Рассматривая вопрос применения теплоизоляционных материалов в строительстве, нельзя не остановиться на легких заполнителях для бетонов. Улучшить теплотехнические характеристики строящихся и эксплуатируемых зданий можно, применив теплые штукатурки. В нашей стране незаслуженно мало внимания уделяется этому эффективному материалу. Штукатурка может быть нанесена при выполнении строительных работ как на наружную, так и на внутреннюю поверхность зданий. При толщине слоя 4–6 см сопротивление теплопередаче кирпичных стен может быть увеличено в 1,5–2 раза.

Рассмотрим также жидкие покрытия. В 2002 году с использованием целого ряда разработок ведущих предприятий ВПК и Российской академии наук было создано жидко-керамическое покрытие «Изоллат». Покрытие «Изоллат» обладает низкой теплопроводностью, способно отражать и рассеивать 90 % излучения. Применение специальных наполнителей обеспечивает этому покрытию способность обеспечивать высокотемпературную изоляцию, огне- и морозостойкость, сейсмоустойчивость, коррозионную защиту. Покрытие «Изоллат» может служить без потери эксплуатационных характеристик не менее 10 лет и является экологически безопасным для здоровья человека.

К новым материалам, развитие применения которых также позволило бы решать проблему утепления зданий, можно отнести такие материалы, как лигноперлит, термоперлит, эпсоперлит, пеноизол, геокар, дина терм, тизол и другие [1]. Сегодня в условиях бурного развития мелкого бизнеса и индивидуального творчества появляется большое количество новых теплоизоляционных материалов, поражающих свойствами и ценами. Однако при их использовании в строительстве следует применять только те, которые прошли испытания в специализированных, аккредитованных Госстроем и Ростестом лабораториях и центрах.

В России в последние годы проблеме энергосбережения уделяется много внимания [2]. Первыми шагами на пути ужесточения норм теплопотерь явилось введение Госстроем РФ новых норм теплопотерь, предусмотренных изменениями в СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» [3]. Разработанные как единые для всей страны нормы тепловых потерь определялись исходя из стоимости тепловой энергии, материалов, трудозатрат при монтаже. Указанные факторы с течением времени и в результате внедрения в экономику рыночных отношений приобретают все большее различие для регионов страны. Приведенные в указанном СНиПе территориальные коэффициенты устарели и требуют корректировки. В связи с этим, наряду с федеральными нормами, которые должны отражать наиболее общую концепцию нормирования теплопотерь, должны получить развитие региональные нормы, учитывающие конъюнктуру и динамику изменения цен на энергоресурсы и материалы в конкретном регионе. Такой подход уже начал реализовываться в строительном комплексе и является, на наш взгляд, правильным [4].

Таким образом, можно констатировать, что только комплексный подход к рациональному использованию тепловой изоляции, включающий в себя разум-

ную нормативную политику, расширение номенклатуры и качества отечественных утеплителей, профессиональный подход к разработке и монтажу теплоизоляционных конструкций, системный контроль состояния тепловой изоляции объектов несет в себе значительные резервы экономии топливно-энергетических ресурсов страны.

#### Список литературы

1. Кузнецов Г. Н. Тепловая изоляция : справочник строителя. М. : Стройиздат, 1985. 421 с.
2. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ (в ред. от 04.10.2014) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Энергетический ресурс]. URL: [http://base.garant.ru/12171109/1/#block\\_100](http://base.garant.ru/12171109/1/#block_100) (дата обращения: 28.10.2014).
3. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Введ. 2003-11-01. М. : Госстрой, 2003. 28 с.
4. СП 60.13330.2012 Отопление, вентиляция и кондиционирование. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. Введ. 2013-10-01. М. : Госстрой, 2012. 28 с.

УДК 621.643

Тарасов А. А., Щеклеин С. Е.  
Уральский федеральный университет, t  
arasov@email.su

## **АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СПОСОБОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА ИЗ МЕСТ УДАЛЕННОЙ ДОБЫЧИ**

В связи с расширением арктических территорий Российской Федерации и началом реализации программы практически значимых проектов, обеспечивающих решение задач «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года», необходимо выработать и экономически обосновать различные методы транспортировки природного газа, такие как транспортировка сжиженного газа, транспортировка газа при высоком давлении без применения технологии сжижения и транспортировка газовых гидратов с места добычи на шельфе арктических морей Северного Ледовитого океана до мест использования природного газа в промышленные регионы Севера нашей страны и к зарубежным партнерам.

Технология сжижения природного газа давно изучена и довольно быстро развивается во всём мире, строятся заводы по сжижению природного газа в странах Европы, Северной и Южной Америках, Японии и Китае, а также подобные заводы строятся различными нефтегазовыми корпорациями в странах Ближнего Востока и Африки, и единственный в России завод по сжижению природного газа на острове Сахалин (проект «Сахалин-2»). Это неудивительно, так как транспортировка сжиженного природного газа (далее СПГ) морскими судами на дальние расстояния является более выгодной в отличие от перекачки

по магистральному трубопроводу газа под высоким давлением. Например, по расчетам, морская перевозка СПГ на расстояние 5000 км обходится не дороже перекачки по магистральному трубопроводу на расстояние 2500 км [1] с учетом того, что СПГ соотносится с газом под высоким давлением как 1:600–640. Широкое распространение в мире получили циклы на смесях хладагентов (однопоточный каскадный цикл с использованием внешней холодильной установки), у которых удельный расход энергии составляет 0,55–0,6 кВт·ч/кг СПГ.

Для производства 1 млн м<sup>3</sup> СПГ в сутки с давлением в 4,6–5,3 МПа требуется мощность 10,3–13,3 МВт [2]. Следовательно, расход мощности на производство 1 м<sup>3</sup> СПГ, включая затраты энергии на создание давления, перекачку и сжижение природного газа, составит 0,89–1,15 МДж/м<sup>3</sup>. Одним из новых методов использования природного газа в целях его дальнейшей транспортировки является производство газовых гидратов. Оценка энергетических затрат на производство и транспортировку газовых гидратов (далее ГГ) варьируется от 195 до 365 долл. США на 1000 м<sup>3</sup> ГГ. В существующем патенте РФ 2200727 [3] указана расчетная величина, определяемая для получения ГГ из природного газа путем охлаждения природного газа при расширении в реакторе (эффект Джоуля–Томсона). Следовательно, теплота образования ГГ из природного газа, указанного в данном патенте состава, при температуре выше 0 °С составляет около 2075 Дж/кг ГГ, что при плотности  $\rho_{\text{ГГ}} = 900 \text{ кг/м}^3$  получаем значение, равное 1,87 МДж/м<sup>3</sup>.

Для газификации удаленных поселений рассматривается вариант их снабжения газом в сжиженном состоянии (СПГ). В настоящее время такое снабжение осуществляется небольшими баллонами (до 120 л), что не может удовлетворить потребности муниципальных образований.

Широко используемой схемой транспортировки природного газа из России в страны ближнего и дальнего зарубежья являются газовые трубопроводы высокого давления.

Альтернативой указанным схемам является доставка жителям удаленных территорий сжатого газа (КПГ), затраты на производство которого значительно ниже, чем при сжижении:

- затраты на компримирование составляют примерно 0,58 кВт·ч/кг газа, или 0,52 МДж/м<sup>3</sup>, что в 2 раза ниже затрат на сжижение;
- выполнение требований к подготовке и очистке газа для технологий КПГ гораздо проще, чем для производства СПГ;
- инфраструктура (приемные и наливные сооружения) для КПГ также проще и дешевле, чем терминалы СПГ [4].

Как показывает оценка USGS (The United States Geological Survey – Геологическая служба США), Арктика является кладовой не столько нефти, сколько газа, и основная часть запасов сосредоточена в прибрежной зоне континентального шельфа, причем более 70 % оцениваемых запасов газа — всего в трех бассейнах: Западно-Сибирском (40 %), Восточно-Баренцевом (19 %) и Аляскинском (13 %). Наиболее перспективными являются регионы — Карское море и море Лаптевых [5, 6].



Ниже приведены сводные данные затрат энергии транспортировки 1 м<sup>3</sup> природного газа, E<sub>G</sub>, МДж/м<sup>3</sup>:

Сжиженный природный газ (СПГ).....	0,89-1,2;
Природный газ сжатый (КПГ).....	0,52;
Газовый гидрат природного газа (ГГ) .....	до 1,87;
Газ высокого давления (трубопроводы) .....	0,094.

Из этих данных видно, что газовые гидраты требуют больших затрат энергии на производство и транспортировку. Однако это связано с тем, что в настоящее время эта технология является совершенно новой, но имеющей перспективы, так как для перевозки ГГ природного газа (в частности, метана – CH<sub>4</sub>) не нужно создавать специальные условия с охлаждением и поддержанием высокого давления, как в представленных выше технологиях.

#### Список литературы

1. Касаткин Р. Г. Система морской транспортировки сжиженного природного газа из Арктики. М. : Изд-во ЛКИ, 2008. 104 с.
2. Технико-экономическая характеристика систем СПГ [Электронный ресурс]. URL: <http://lngas.ru/analytics-lng/techniko-ekonomicheskaya-karakteristika-sistem-spg.html> (дата обращения: 22.11.2014).
3. Способ транспортирования или хранения гидратов газов : пат. 2200727 РФ / Гудмундссон Йон Стейнар [Электронный ресурс]. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2200727> (дата обращения: 22.11.2014).
4. УралНИТИ и Корпорация «Развитие» могут запустить производство танк-контейнеров для перевозки компримированного газа [Электронный ресурс]. URL: <http://www.energoboard.ru/news/1332-uralniti-i-korporatsiya-razvitie-mogut-zapustit-proizvodstvo-tank-konteynerov-dlya-perevozki-komprimirovannogo-gaza.html> (дата обращения: 22.11.2014).
5. Circum-Arctic Resource Appraisal [Электронный ресурс]. URL: <http://energy.usgs.gov/arctic/> (дата обращения 22.11.2014).
6. Центр военно-политических исследований МГИМО [Электронный ресурс]. URL: <http://eurasian-defence.ru/> (дата обращения: 22.11.2014).

УДК 621.311.22

Тарасова П. С., Вальцев Н. В.  
Уральский федеральный университет,  
[polino4katt@gmail.com](mailto:polino4katt@gmail.com)

## СОВРЕМЕННЫЕ ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СПОСОБ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

Комбинирование паро- и газотурбинных установок в одном тепловом цикле парогазовой установки (ПГУ) позволяет сочетать высокотемпературный (в газовой турбине) подвод и низкотемпературный (в конденсаторе паровой турбины) отвод теплоты и в результате обеспечивает повышение термического КПД цикла, а следовательно, экономичности производства электрической энергии.

На сегодняшний день достигнутая эффективность ПГУ на природном газе составляет 61 %, а мощности энергоустановок варьируются от 10 до 500 МВт. Помимо высоких показателей термической эффективности и экологичности,

парогазовые установки имеют множество других преимуществ: легкий пуск и останов, короткие сроки возведения (9–12 мес.), меньшие капитальные затраты и количество обслуживающего персонала по сравнению с паросиловой технологией [1]. В таблице представлены показатели, достигнутые ведущими энергомашиностроительными компаниями мира [2–4].

Параметры ПГУ в мире

Показатель	Фирма					
	GE		Siemens		MHI	
Частота сети, Гц	50	60	50	60	50	60
Мощность ПГУ, МВт	480	400	530	380	670	460
КПД ПГУ, %	60	60	60,75	Более 60	61	61,2
Маркировка ПГУ	109H	107H	SCC5-8000H	SCC6-8000H	MPSP17J	MPSP15J
Начальная температура газов, °С	1430	1430	1500	1500	1600	1600
Степень повышения давления	23	23	19,2	20	23	23
Температура отработавших газов, °С	593	593	625	620	–	–
Концентрация NO <sub>x</sub> , ppm	15		25		15	

В качестве примера реализации ПГУ с КПД свыше 60 % можно привести контракт, заключенный фирмой Siemens на сооружение в 2013 году «под ключ» ПГУ мощностью 400 МВт для ТЭС «Bugok 8» в Южной Корее. Эта ПГУ строится на базе ГТУ SGT6-8000H мощностью 270 МВт, предназначенной для энергосистем с частотой сети 60 Гц. Такие высокие результаты были получены при повышении температуры газов и оптимизации пароводяного цикла без ухудшения эксплуатационной гибкости за счет применения дополнительных устройств внешнего охлаждения лопаток в сочетании с увеличением массового расхода пара в конденсаторе [5].

К недостаткам ПГУ можно отнести высокие требования к качеству воздуха и, главное, к качеству используемого топлива. Высокая стоимость чистых топлив, таких как природный газ, в первую очередь и сдерживает массовое использование ПГУ в мире. Тем не менее их совершенствование продолжается.

В качестве направлений дальнейшего повышения КПД ПГУ рассматриваются:

- увеличение температуры на входе в газовую турбину до 1700 °С и выше;
- увеличение степени повышения давления до 50 для максимального использования преимуществ высокой температуры;
- модернизация газового цикла (перегрев, промежуточное охлаждение, увлажнение воздуха на входе);
- повышение изоэнтропной эффективности турбины и компрессора;

- повышение параметров паросилового цикла с переходом к сверхкритическим и ультрасверхкритическим с ростом температуры на входе (а следовательно, и на выходе) ГТУ;
- переход к использованию новых рабочих тел как для верхнего, так и нижнего цикла.

Однако производители ГТУ столкнулись с серьезными проблемами: повышение температуры на входе ГТУ ведет к росту рабочей температуры лопаток до  $\sim 1040^\circ\text{C}$  и обмуровки камер сгорания, что требует применения новых еще более дорогих материалов и передовых термобарьерных покрытий, а также разработки новых способов охлаждения [1, 6]. В связи с нехваткой в перспективных ГТУ воздуха на охлаждение разработаны турбины с охлаждением паром, хотя это ухудшает их эксплуатационные характеристики и снижает маневренность, что критично, например, в Германии, где ПГУ резервируют установки на основе возобновляемых источников энергии. В ближайшей перспективе, по-видимому, возможно незначительное дальнейшее повышение эффективности ПГУ, в первую очередь, за счет оптимизации цикла в целом, подбора наилучших рабочих параметров и сочетания оборудования для конкретных энергоустановок.

В России стоимость природного газа относительно невысока, что способствует повышению конкурентоспособности парогазовых установок, о чем свидетельствует их массовое строительство в последние 10 лет. Однако, к сожалению, у нас не производятся современные газовые турбины, таким образом, энергоблоки вводятся на основе не самого современного импортного оборудования.

Долгое время примером для подражания считалась Северо-Западная ТЭЦ, находящаяся в Санкт-Петербурге, где технология парогазового цикла обеспечивает КПД на уровне 51,5 %. Для обеспечения энергобезопасности олимпийских игр в Сочи построили новую ТЭЦ с парогазовыми установками, имеющими КПД более 50 % [7]. В 2010 г. на Тюменской ТЭЦ-1 состоялся пуск энергоблока № 2 мощностью 190 МВт по электроэнергии и 220 Гкал/ч по тепловой энергии. Коэффициент полезного действия нового блока в теплофикационном режиме составляет 63 %. Коэффициент использования тепла топлива 85 %. В 2011 году на Челябинской ТЭЦ-3 состоялся пуск энергоблока № 3 мощностью 216,3 МВт по электрической и 47,8 Гкал/ч по тепловой энергии. Коэффициент полезного действия нового блока в теплофикационном режиме составляет 77,4 %. Коэффициент использования тепла топлива 86 % [8]. На Сургутской ГРЭС-2 введены два новых парогазовых энергоблока суммарной мощностью 797,1 МВт, КПД ПГУ около 50–52 %.

Россия находится в самом начале пути освоения и массового внедрения парогазовых технологий. Даже переоснащение действующих в России ТЭЦ и ТЭС парогазовыми установками даст значительный экономический и экологический эффект. Но на вновь строящихся объектах тем более необходимо использовать только самые современные технологии, а также создать линейку энергоблоков ПГУ, отвечающих современным мировым требованиям, силами отечественного машиностроения.

Высокая эффективность парогазовых установок обеспечена благодаря целому ряду прорывных достижений в области материаловедения, металлургии, гидрогазодинамики и теплообмена. Они по праву занимают свое место в авангарде технологий производства электроэнергии и продолжают совершенствоваться.

#### Список литературы

1. Ashok D. Rao Combined cycle systems for near zero emission power generation. New Delhi : Woodhead Publishing, 2012.
2. Siemens Fossil Power Generation [Электронный ресурс]. URL: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/fossil-power-generation/> (дата обращения: 29.11.2014).
3. General Electric [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ge-energy.com> (дата обращения: 29.11.2014).
4. Mitsubishi Heavy Industries [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mhi-global.com> (дата обращения: 29.11.2014).
5. CCGT: Breaking the 60 per cent efficiency barrier // Power Engineering International. 2010. Vol. 18 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-18/issue-3/features/ccgt-breaking-the-60-per-cent-efficiency-barrier.html> (дата обращения: 29.11.2014).
6. Ashok D. Rao, David J. Francuz // Applied Energy. 2013. Vol. 102. P. 1178–1186.
7. Сочинская ТЭС [Электронный ресурс]. URL: <http://irao-generation.ru/stations/sochig/> (дата обращения: 29.11.2014).
8. Челябинская ТЭЦ-3 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fortum.com/countries/ru/about/investment/chel-cps/pages/default.aspx> (дата обращения: 29.11.2014).

УДК 621.313

Тихонова О. В., Малыгин И. В., Пластун А. Т.  
Уральский федеральный университет

### **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАКЕТА «ANSYS MAXWELL» ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

В настоящее время при выполнении студентами курсового и дипломного проектирования существует огромный выбор различных прикладных программ, с помощью которых можно осуществлять моделирование электрических машин, а также их электромагнитные, тепловые и механические расчеты. Среди таких пакетов можно выделить «MathLab», «LCad», «ANSYS». Стоит отметить, что у прикладного пакета «ANSYS» существует несколько видов различных приложений, направленных на определенный анализ: механический, электромагнитный, вентиляционный и т.п. Продукт «ANSYS Maxwell» является пакетом, адаптированным для электромагнитного расчета электрических машин, позволяющим анализировать различные виды двигателей и генераторов классического исполнения в режимах 2D и 3D.

«ANSYS Maxwell» содержит приложение RMXprt, которое дает возможность пользователю провести первичный расчет машины. В своей базе RMXprt

имеет около 13 видов встроенных машин: это синхронные и асинхронные двигатели и генераторы классической конструкции, а также машины постоянного тока. Задавая геометрические параметры какой-либо машины классического исполнения, можно получить ее электрические данные, рабочие и пусковые характеристики. В то же время асинхронного двигателя с двумя короткозамкнутыми клетками в списке RMXprt нет, т.е. данное приложение не имеет возможности просчитать подобную конструкцию.

«ANSYS Maxwell» имеет также режимы расчета 2D и 3D, где реализована возможность самостоятельно прорисовать геометрию, используя геометрические примитивы пакета. Можно прорисовать конструкцию в программах «Компас3D» или «AutoCad», а затем конвертировать ее «ANSYS Maxwell», но при этом может возникнуть так называемая проблема «преобразования линий», так как «Maxwell» требует, чтобы в геометрии использовалась полилиния, т.е. линия, не имеющая разрывов. В связи с этим рекомендуется использовать графику, имеющуюся в пакете «ANSYS Maxwell».

Следующей особенностью при использовании данного программного пакета является задание граничных условий и источников возбуждения. Необходимо правильно задать граничные условия – допущения, задаваемые и принимаемые при расчете. Во-первых, следует указать, что поле существует только в самой машине, а все, что находится вокруг машины, – окружающая среда, в которой поле не распространяется. Для этого существует граничное условие «векторный потенциал». На границе машины поле следует обнулить. Во-вторых, необходимо указать длину машины, а также определить, целиком ли будет считаться машина или частично. Если машина симметрична, то существует возможность упростить расчет, «разрезав» геометрию, а в граничных условиях указать симметрию.

Также существует проблема «открытых границ», с которой расчетчик может столкнуться при вычислении индуктивности катушки в режиме 3D. Рассчитывая модель в программе «ANSYS Maxwell», необходимо вокруг модели создать внешнюю область, размеры которой должны быть равны 4–5 радиусам рассчитываемого объекта. Допустим, что рассчитывается индуктивность катушки. Учтем, что катушка – это источник поля, для создания которого нужно пространство. Ограничивая это пространство, мы ограничиваем индуктивность, так как программа автоматически обнуляет поле на границе области, и как следствие, индуктивность определяется неверно. В режиме 2D необходимо задать граничное условие «Balloon», которое программа понимает как бесконечно большое пространство вокруг модели. В режиме 3D следует задать область вручную в виде параллелепипеда, окружающего модель. При этом границы параллелепипеда следует увеличивать до тех пор, пока расчетное значение индуктивности не перестанет меняться более чем на 5 %.

В качестве источников возбуждения при моделировании обычно берутся катушки обмотки статора и обмотки возбуждения. Трудности возникают при задании короткозамкнутых клеток роторов асинхронных двигателей. Короткозамкнутые стержни необходимо представить в виде параллельных проводников, сходящихся в одной точке. «ANSYS Maxwell» предлагает пользователю

источник «End Connection», но доступен он только в режиме расчета «Движение», а в статических режимах не предусматривается. Кроме того, в режиме 2D нет возможности просмотра и определения тока в стержне. Имеется возможность определения лишь тока в кольце.

Еще одной немаловажной проблемой является построение сетки программой. Как известно, расчет в «ANSYS Maxwell» основан на методе конечных элементов, т.е. программа сначала строит параметрическую сетку, а затем, используя значения параметров в сеточных узлах, производит расчет. Если между элементами модели существует слишком малый конструктивный зазор, но вы хотите этот зазор учесть при магнитном расчете поля, то построение сетки целесообразно выполнять вручную. Поэтому, если это не принципиально, то для уменьшения временных затрат на расчет целесообразно такие зазоры не учитывать.

Прикладной пакет «ANSYS Maxwell» позволяет пользователю, с одной стороны, автоматизировать задачи при проектировании электромагнитных и электромеханических преобразователей энергии, расчеты сделать более наглядными и понятными, но, с другой стороны, существуют особенности, возникающие при применении указанного пакета. Связаны эти проблемы как с заданием геометрии магнитной цепи, граничных условий и источников магнитодвижущих сил, так и с построением сетки и выводом результатов расчета.

#### Список литературы

1. Тихонова О. В. О целесообразности введения прикладного пакета «ANSYS Maxwell» в учебную программу для бакавров // Электроэнергетика глазами молодежи. Науч. тр. V Междунар. техн. конф, г. Томск, 10–14 ноября 2014 г. Томск : Томский политех. ун-т, 2014. Т. 2. С. 599–603.

УДК 620.9

Ткачев В. К., Трубицын К. В., Елфимов С. В.  
Самарский государственный технический университет  
tef-samgtu@yandex.ru

## **КАДРОВЫЙ РЕЗЕРВ ДЛЯ ИННОВАЦИОННО АКТИВНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

В настоящее время Правительство РФ проводит политику создания Российской модели инновационной экономики. Для этого федеральными и региональными правительствами создаются особые экономические зоны (ОЭЗ), проводится политика повышения инвестиционного климата, создаются благоприятные условия для бизнеса, фонды венчурных инвестиций и финансирования инновационных проектов. Однако на данный момент высшие должностные лица на всех уровнях отмечают малую эффективность принятых мер.

В связи с этим все более актуальным становится вопрос подготовки кадров для различных отраслей промышленности нашей страны, так как именно грамотный, инновационно активный персонал способен вывести экономику государства на инновационный путь развития.

Целями проекта создания кадрового резерва для инновационно активных предприятий энергетики (на примере Самарской области) являются:

- создание Малой инновационной академии Самарской области;
- формирование кадрового резерва инновационно активного персонала предприятий энергетики Самарской области;
- создание Интернет-портала кадрового резерва инновационно активного персонала предприятий энергетики Самарской области.

Задачами проекта обозначены:

- развитие систем подготовки, повышения квалификации, обмена опытом для кадрового резерва предприятий энергетики в сфере инновационной деятельности;
- поддержка реализации инновационных проектов, направленных на развитие высокотехнологичных производств в энергетической отрасли на территории Самарской области;
- подготовка и включение в кадровый резерв энергетических предприятий наиболее перспективных выпускников вузов Самарской области, отвечающих запросам современной инновационной экономики.

Основными благополучателями от реализации проекта станут образовательные структуры и предприятия энергетики, Правительство Самарской области (Министерство экономического развития и торговли) и выпускники Малой инновационной академии (старшекурсники вузов).

Образовательные структуры в ходе реализации проекта обеспечивают такие собственные преимущества, как повышение качества высшего профессионального образования, более компетентные и отвечающие запросам инновационной экономики выпускники, наличие способов взаимодействия и коммуникации с работодателями.

Энергетические компании получают возможность определять дополнительные, инновационные компетенции для будущих сотрудников; инновационно активный персонал и инновационные предложения от лучших выпускников области для их последующего внедрения.

Министерство экономического развития и торговли Самарской области обеспечивает кадровый резерв из числа инновационно активных выпускников для работы на энергетических предприятиях Самарской области; повышение уровня инновационной активности энергетических компаний; повышение инвестиционной привлекательности региона в глазах российских и зарубежных инвесторов.

Выпускники Малой инновационной академии получают возможность обоснованного планирования обучения и карьеры, а также признание собственных компетенций и квалификаций, что повышает возможность трудоустройства и карьерного роста.

Реализация проекта предполагает следующие шаги:

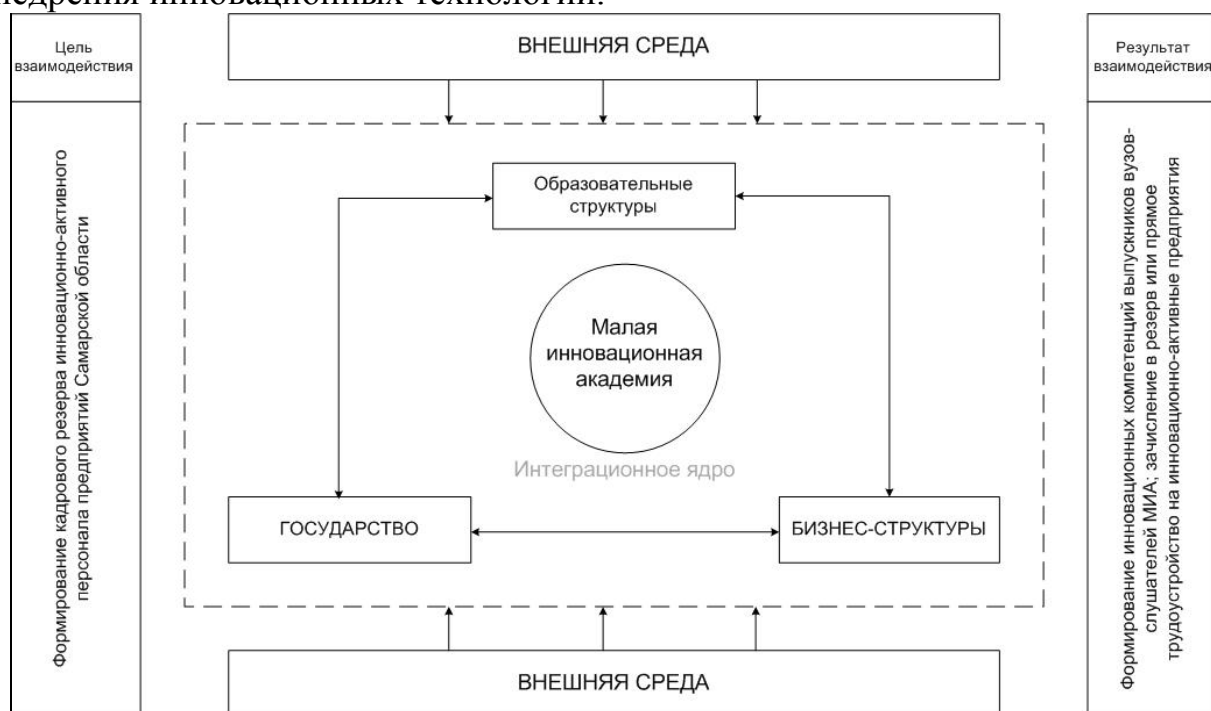
- формирование интеграционной среды взаимодействия участников проекта (основных благополучателей);
- отбор наиболее способных студентов вузов Самарской области для участия в проекте;
- образовательная программа, направленная на приобретение необходимых для последующей инновационной деятельности компетенций и состоящая из трех взаимосвязанных блоков («Технология инноваций», «Экономика инноваций» и «Курс молодого лидера»);
- разработка инновационных решений для энергетических компаний губернии;
- экзаменация, подведение итогов, трудоустройство или зачисление участников проекта в кадровый резерв инновационно активного персонала энергетических предприятий региона.

Схема предполагаемого интеграционного взаимодействия представлена на рисунке.

Отбор слушателей для участия в проекте проводится на основании комплексной оценки, которая будет сформирована из трех интегральных показателей – интегральных оценок учебной, научно-исследовательской и общественной деятельности студента.

Образовательная программа предусматривает наличие трех блоков – «Технология инноваций», «Экономика инноваций» и «Курс молодого лидера».

Содержание образовательного блока «Технология инноваций» содержит информацию о перспективных инновационных направлениях развития энергетической отрасли, а также о зарубежном и отечественном опыте разработки и внедрения инновационных технологий.



Взаимодействие государства, образовательных и бизнес-структур в целях формирования кадрового резерва инновационно активного персонала для промышленных предприятий



Блок «Экономика инноваций» проводится в соответствии со спецификой отрасли. В нем даются основные экономические показатели инноваций в энергетике, оценка их экономической целесообразности и эффективности, способы коммерциализации инновационных решений и т.д.

В рамках блока «Курс молодого лидера», который единообразен для всех групп, слушатель получит такие знания, как ораторское искусство и мастерство презентации, ведение проектной деятельности, защита инновационных проектов, лидерские качества руководителя, деловая этика, ведение деловых переговоров, инструменты работы с жесткой позицией оппонента.

После окончания образовательной программы слушатели выполняют научно-исследовательскую работу, руководствуясь знаниями, умениями и навыками, полученными в ходе обучения по образовательной программе, разрабатывают собственные инновационные предложения для конкретного предприятия энергетики Самарской области. По окончании обучения по образовательной программе и итогам разработки инновационных предложений проходит процедура экзаменации слушателей.

#### Список литературы

1. Ткачев В. К. Формирование кадрового резерва инновационно активного персонала для промышленных предприятий Самарской области // Современный менеджмент: проблемы и перспективы. СПб. : СПбГЭУ, 2013. С. 351–354.
2. Трубицын К. В. Взаимодействие вузов с предприятиями теплоэнергетики: подготовка кадров для инновационной экономики // Теплофизические основы энергетических технологий: сб. науч. трудов. СПб. : Экспресс; Томск : Томский политехн. ун-т, 2012. С.137–147.

УДК 621.357.1

Усков И. А., Гоман В. В., Федореев С. А.  
Уральский федеральный университет,  
Uskov.ntmk@live.ru

### **РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЛЕГКОПЛАВКИХ СПЛАВОВ НА КОНТАКТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

В настоящее время существует разработанная в УрФУ инновационная технология нанесения защитных металлопокрытий на контактные поверхности электрооборудования. Технология применяется на предприятиях Свердловской области при ремонте и обслуживании электрохозяйства, что обеспечивает снижение потерь в электрических сетях и существенное повышение надежности электроснабжения.

В 2014 году данной технологией заинтересовались производители электрооборудования (электрощитовой продукции). Для данной категории заказчиков необходимо нанесение покрытий на шинную продукцию в больших объемах и в короткие сроки. При этом ручной вариант технологии, используемый в

практике эксплуатации электрооборудования, не обеспечивает достаточную производительность.

В базовой технологии, на которой основывается данный проект, для получения защитного металлопокрытия на токопередающих поверхностях контактов использован процесс локального контактного твердожидкого плавления, при котором взаимодействие твердого металла с жидким происходит ниже температуры автономного плавления твердого металла. В самом общем виде процесс состоит из двух стадий: локальное плавление твердого металла после смачивания его с жидким поверхностно-активным сплавом заданного состава (бездиффузионная стадия), а затем диффузионное перемешивание атомов твердого металла из расплавившегося объема и жидкой фазы нанесенного сплава (диффузионная стадия). После затвердевания на контактной поверхности образуется слой металлопокрытия, представляющего собой новое вещество (твердый раствор двух металлов), отличающееся по своим физическим и химическим свойствам как от материала контакт-детали, так и от нанесенного на ее поверхность легкоплавкого сплава. Применение в данной технологии сплавов с температурой плавления 40–90 °С позволяет получить защитное металлопокрытие при температуре нагрева контакт-деталей не выше 100 °С.

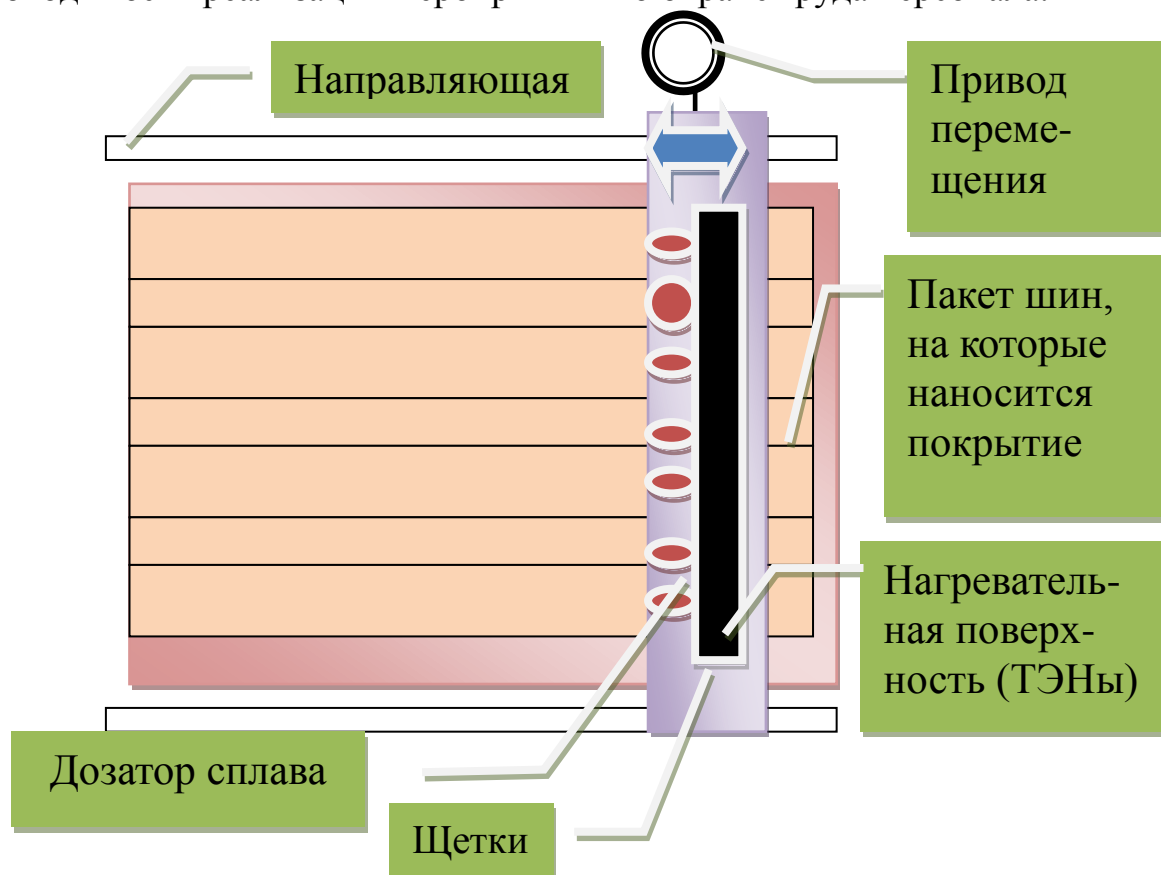
Также ключевым элементом новизны является то, что в отличие от известных разработок УрО РАН и УрФУ в области неподвижных контактных соединений, в которых использовались галлиевые сплавы, в данной разработке используются сплавы на базе висмута и индия. Их нанесение на рабочие поверхности контакт-деталей происходит при несколько большей температуре (40–90 °С), однако известные свойства индия (низкий коэффициент трения, коррозионная стойкость, смачиваемость) обеспечивают значительное улучшение механической стойкости к износу контактного соединения. Также отсутствует эффект охрупчивания алюминия галлием, который мог приводить к разрушению контактных соединений. При этом эффект снижения переходного сопротивления также присутствует, как и при применении галлиевых поверхностно-активных сплавов.

Основная идея проекта: разработка высокопроизводительной установки, пригодной для использования производителями электрооборудования и являющейся более выгодной альтернативой традиционным гальваническим, газодинамическим, электроискровым установкам (см. рисунок).

В установке будет использована инновационная технология нанесения легкоплавких сплавов на контактные поверхности электрооборудования, применяемая ранее в ручном исполнении, которая имеет проверенные и подтвержденные показатели эффективности, такие как снижение потерь, повышение срока службы, снижение вероятности аварий и повреждений электрооборудования и сетей.

Главное преимущество предлагаемой технологии по сравнению с традиционными лужением и серебрением контактов состоит в том, что нанесение оловянистых или серебряных металлопокрытий связано либо с нагревом контакт-детали до температуры 320–400 °С (лужение), либо с необходимостью использования сложного специального оборудования (гальваника, электроискро-

вое или плазменное (газодинамическое) напыление). Использование данного оборудования приводит к возникновению экологических рисков, а также к необходимости реализации мероприятий по охране труда персонала.



Прототип установки, разрабатываемый совместно с одним из предприятий-заказчиков

Себестоимость 1 м<sup>2</sup> покрытия по предлагаемой технологии в ряде случаев существенно ниже аналогов.

Экономические показатели на примере конкретного предприятия – потенциального заказчика: применяемая в настоящий момент технология (лужение) имеет себестоимость 3300 руб./км<sup>2</sup>, что при усредненных годовых объемах производства приводит к затратам 792 тыс. руб. в год. Предлагаемая технология дает себестоимость 2000 руб/м<sup>2</sup> и затраты в размере 480 тыс. руб. в год. Экономия составляет 312 тыс. руб. в год. При цене установки для заказчика 415 тыс. руб. срок окупаемости составит 1,33 года.

Экономический эффект для конечных потребителей электротехнической продукции будет обусловлен следующими факторами:

- уменьшение затрат на обслуживание и ремонт контактных соединений, увеличение межремонтных промежутков;
- уменьшение вероятности значительного экономического ущерба вследствие аварий и простоев оборудования, вызванных отказом электрических контактных соединений;
- уменьшение потерь электроэнергии за счет снижения переходного сопротивления (алюминий (Al-Al) – 10–15 раз; алюминий-медь (Al-Cu) – 3–7 раз; медь-медь (Cu-Cu) – 1,4–2 раза).

Таким образом, разработка и внедрение автоматизированной установки для нанесения защитных металлопокрытий нового типа позволит организовать производственный процесс с высокой производительностью на предприятиях-производителях электрооборудования, а также снизить потери электроэнергии и повысить надежность электроснабжения как в масштабах региона, так и в масштабах России.

УДК 662.76

Федорова Ю. С., Кузнецова Ю. А., Абаимов Н. А.  
Уральский федеральный университет,  
tes.urfu@mail.ru

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОТОЧНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ**

На сегодняшний день уголь является наиболее дешевым и доступным углеводородным топливом на Земле. Однако низкая эффективность традиционных угольных электростанций с паросиловым циклом и их несоответствие ужесточающимся экологическим требованиям препятствуют быстрому переходу мировой энергетики на сжигание твердого топлива. По оценкам Министерства энергетики США, наиболее перспективной технологией использования твердого углеродосодержащего топлива является парогазовая установка с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ) [1].

Ключевым элементом высокомошных ПГУ-ВЦГ является газификатор [2]. В энергетике используют газификаторы с неподвижным слоем, с кипящим слоем и поточные газификаторы. Именно поточные газификаторы наиболее часто используют в современных ПГУ-ВЦГ благодаря их высокой эффективности и производительности [3].

Поточная газификация включает в себя ряд сложных физических и химических процессов, экспериментально исследовать которые очень трудно и дорого. Поэтому для решения задач по визуализации, управлению и оптимизации поточной газификации всё чаще прибегают к методу вычислительной гидродинамики (CFD). CFD-моделирование позволяет определять все основные параметры работы газификаторов: состав и температуру получаемого синтез-газа, степень конверсии углерода, а также структуру и свойства потоков внутри самого газификатора. Тем не менее до сих пор не существует универсальных моделей поточной газификации, которые одинаково адекватно описывали бы работу поточных газификаторов с разной геометрией, топливом и рабочими параметрами [4]. В данной работе будут обсуждаться и сравниваться между собой основные современные физические и химические модели, используемые при моделировании современных поточных газификаторов.

Под физическими моделями здесь имеются в виду модели турбулентных течений. Данным вопросом применительно именно к поточной газификации

занимались в работе [5]. В ней – помимо описания моделей и процесса моделирования представлено сравнение результатов моделирования, полученных с использованием двух наиболее широко распространенных моделей: уравнения Навье-Стокса, осредненного по Рейнольдсу (RANS), и модели крупных вихрей (LES). В результате верификации и сравнения полученных результатов авторы приходят к выводу, что модели RANS и LES дают ощутимо различные значения, касающиеся смешивания, горения и газификации. При сопоставлении данных моделирования с экспериментальными значениями оказалось, что RANS-модель предсказывает более короткую зону горения, чем на самом деле, а LES – более длинную. Модель RANS оказалась наиболее адекватна в приосевой области газификатора, но в зоне газификации ее результаты далеки от эксперимента в отличие от LES-модели, которая показывает лучшую сходимость как по радиальной координате, так и в области газификации. Основным вывод данной работы заключается в том, что LES-модель адекватна в большинстве случаев, хотя при определенных условиях RANS является точнее. Однако для практического применения LES-модель все еще остается слишком требовательной к вычислительным мощностям, поэтому большинство исследователей старается максимально эффективно и с наименьшими неточностями использовать RANS-модель.

Основными химическими процессами поточной газификации можно считать пиролиз и горение коксового остатка. Тщательный анализ подмоделей этих процессов был проведен в работах [6] и [7] соответственно. Под пиролизом авторы понимали термическое разложение исходной молекулярной структуры угля при определенной температуре. При этом образуются газы, смолы и кокс. В работе рассматривались две группы моделей:

1) эмпирические:

а) модель одноступенчатой реакции первого порядка (SFOM);

б) конкурирующая двухступенчатая модель (C2SM);

в) модель распределенной энергии активации (DAEM)) и

2) математические:

а) химическая фильтрация летучих веществ (CPD);

б) функциональная группа – деполимеризация, испарение, образование поперечных связей (FG-DVC);

3) теория быстрого выхода летучих (FLASHCHAIN).

В результате верификации наиболее адекватными моделями оказались из эмпирических C2SM, а из математических CPD.

Горение коксового остатка изучалось в работе [7]. В ней оно рассматривалось как сложный процесс, включающий в себя несколько физических и химических явлений:

1) диффузию газов к внешней поверхности частицы;

2) диффузию газов внутри пористой структуры частицы;

3) гетерогенные реакции, в т. ч. поверхностное поглощение, реакции на поверхности и удаление вещества с поверхности;

4) изменение внутренней поверхности частицы;

5) термический отжиг.

Особо подчеркивается, что для адекватного моделирования всего процесса горения кокса необходимо учитывать каждую из этих стадий и их взаимодействие. Тем не менее многие исследователи используют упрощенные модели, не учитывающие изменение поверхности пор и внутреннюю диффузию. Авторы предложили воспользоваться современными версиями модели кинетики выгорания кокса (СВК) для окисления (СВК/Е) и для газификации (СВК/Г). После соответствующей калибровки данные модели показали хорошую сходимость с экспериментальными данными.

В заключение следует еще раз отметить, что универсальных моделей не существует. Даже самые подробные модели, которые были описаны выше, имеют свою область применения. При этом для калибровки всех моделей необходимо использовать экспериментальные данные.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00524).

#### Список литературы

1. Tennant J. B. Overview of DOE's gasification program, 2010 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/10/gfe/Jenny%20Tennant2\\_Gasification.pdf](http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/10/gfe/Jenny%20Tennant2_Gasification.pdf) (дата обращения: 21.11.2014).
2. О предпроектной проработке гибридной угольной ПГУ с воздухонагревателем / С. И. Гордеев [и др.] // Электрические станции. 2012. № 10. С. 17–21.
3. Разработка низкотемпературных реакторов термохимической конверсии для угольной энергетики / А.Ф. Рыжков [и др.] // Теплоэнергетика. 2013. № 12. С. 47–55.
4. Ma J., Zitney S. E. Computational Fluid Dynamic Modeling of Entrained-Flow Gasifiers with Improved Physical and Chemical Submodels // Energy Fuels. 2012. № 26. P. 7195–7219.
5. Abani N., Ghoniem A. F. Large eddy simulations of coal gasification in an entrained flow gasifier // Fuel. 2013. № 104. P. 664–680.
6. Simulation of entrained flow gasification with advanced coal conversion submodels. Part 1 : Pyrolysis / M. Vascellari [и др.] // Fuel. 2013. № 113. P. 654–669.
7. Vascellari M., Arora R., Hasse C. Simulation of entrained flow gasification with advanced coal conversion submodels. Part 2 : Char conversion // Fuel. 2014. № 118. P. 369–384.

УДК 536.65

Хайруллин И. А., Матвеев С. В., Картавец С. В.  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова  
hairullin-ildar@mail.ru

## ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ ГОРЯЧЕКАТАННОГО ЛИСТА В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

В настоящее время трудно представить жизнь человека без использования стальных изделий. Так в 2013 году в Российской Федерации производство сырой стали достигло 69,4 млн т в год [1]. Почти 90 % из этого стальной прокат. Для его производства в теплотехнологии горячей прокатки необходимо около 1,2 т у. т. [2]. При этом порядка 12 кг у. т. с каждой тонны стали отво-

даться в технологическом процессе горячей прокатки, в зоне душирующих установок (позиция 1 на рис. 1) и рассеиваться в окружающей среде в виде низкопотенциального тепла (не выше 100 °С) охлаждающих теплоносителей (охлаждающих воздуха и воды).

В данной работе ставится задача оценки мощности отвода теплоты от горячекатанного листа в теплотехнологии горячей прокатки.

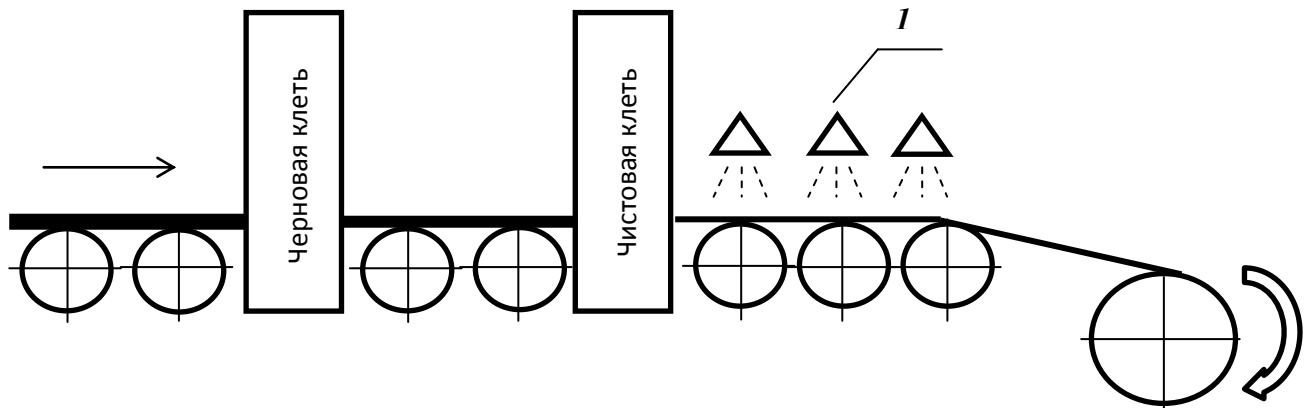


Рис. 1. Принципиальная схема теплотехнологии горячей прокатки

Для решения поставленной задачи были приняты теплофизические параметры, которые были занесены в таблицу.

Теплофизические параметры в теплотехнологии горячей прокатки

Теплофизический параметр	Единица измерения	Значение параметра
Температура листа, после чистовой клетки, $t_n$	°С	1000
Время охлаждения, $\tau$	с	1
Толщина листа, $\delta$	мм	1-3,5
Коэффициент теплоотдачи, $\alpha$	Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	19000
Плотность стального листа, $\rho$	кг/м <sup>3</sup>	7800
Теплоемкость стали, $c$	Дж/(кг·°С)	678
Скорость прокатки, $w$	м/с	20

Так, для листа толщиной 2 мм мощность тепловыделений составила порядка 160 МВт, что сравнимо с мощностью небольшой электростанции. В работе были проведены исследования зависимости мощности тепловыделений от толщины пластины. В результате расчетов нестационарной теплопроводности в пластине был получен следующий результат при охлаждении 1 кг стали за 1 с (рис. 2).

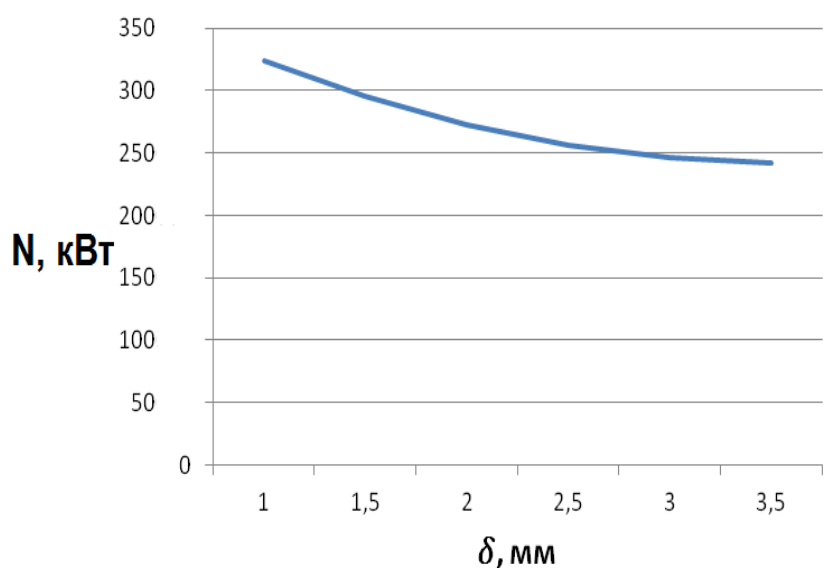


Рис. 2. График изменения мощности в зависимости тепловыделений листа от ее толщины

Как видно из графика, чем больше толщина листа, тем меньше становится мощность его тепловыделений.

Это связано прежде всего с тем, что при увеличении толщины листа увеличивается число Био, и тело из термически тонкого становится термически толстым, а для выравнивания температур в центре листа и на поверхности произойдет за более длительный промежуток времени. Итак одно и то же количество теплоты отводится за разные промежутки времени, что и влияет на мощность тепловыделений. Таким образом, раскаленный лист после горячей прокатки с уменьшением толщины является высокомоощным энергетическим ресурсом, использование теплоты которого в зависимости от направления (генерация электроэнергии или технологическая регенерация теплоты в теплотехнологию горячей прокатки) является актуальным [3] и может позволить экономить до 12 кг у.т. на каждую тонну выпускаемого проката.

#### Список литературы

1. World crude steel output [Электронный ресурс]. URL: <http://www.worldsteel.org/media-centre/press-releases/2014/World-crude-steel-output-increases-by-3-5-in-2013.html> (дата обращения: 12.10.2014).
2. Картавец С. В. Интенсивное энергосбережение и технический прогресс черной металлургии. Магнитогорск : МГТУ, 2008. 312 с.
3. Хайруллин И. А., Матвеев С. В., Картавец С. В. Повышение энергетической эффективности в теплотехнологии горячей прокатки // Энергосбережение – теория и практика : Труды Седьмой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. В 2 т. Т. 1. М., 13-17 октября 2014 г. М. : Издательский дом МЭИ, 2014. С. 112–113

УДК 620.9

Харитонов О. Д.  
Томский государственный университет,  
9130415820@mail.ru

## **ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ РОССИИ**

Эффективное эксплуатирование месторождений нефти и газа устойчивое развитие и функционирование топливно-энергетического комплекса во многом определяют рост экономики страны и благополучие населения. Россия принадлежит к числу стран с высокими показателями энергоемкости ВВП. Так, энергоемкость ВВП России в 2,5 раза больше среднемирового уровня, поэтому направление эффективного использования энергии в России актуально в наши дни.

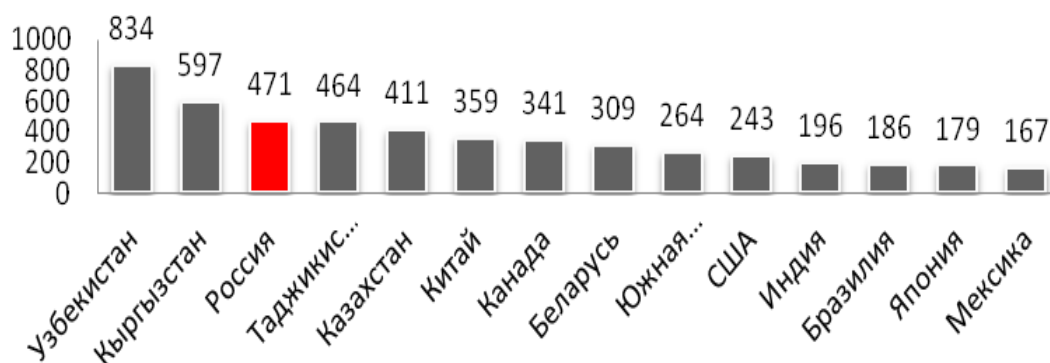
Энергоэффективностью называется вид деятельности, нацеленный на достижение экономически оправданной эффективности использования топливно-энергетических ресурсов с модернизацией существующих технологий и соблюдение требований к охране окружающей среды. Данное направление не являет-



ся схожим с энергосбережением, так как оно рассматривает способы обеспечения зданий промышленных объектов необходимым количеством энергии при сокращении общего объема ее использования, а не изучает процесс экономии энергии в целом.

Проблематика данной статьи обусловлена развитием экономики России с помощью эффективного использования энергоресурсов. Именно это является одной из приоритетных задач социально-экономического развития нашей страны. Государству необходимо вносить существенный вклад в данные направления, чтобы снизить количество выбросов парниковых газов и предотвратить климатические изменения, тем самым обеспечить энергетическую и экологическую безопасность.

Ограничителем конкурентоспособности российской экономики является проблема, заключающаяся в высоком уровне энергоемкости ВВП. Сохранение высокой энергоемкости российской экономики может привести к сдерживанию экономического роста и снижению энергетической безопасности. Необходимо отметить, что из крупнейших мировых держав и стран СНГ Россия занимает третью позицию. По графику видно, что энергоемкость ВВП России превышает почти в два раза показатели США, Индии, Бразилии [1].



Энергоемкость ВВП (кг/1000 долл.) стран СНГ и крупнейших стран мира

Из сказанного выше следует, что Российской Федерации необходимо улучшать показатели энергоемкости. Так, Указом Президента Российской Федерации от 4 июня 2008 г. № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической безопасности российской экономики» поставлена задача снижения энергоемкости ВВП России к 2020 году не менее чем на 40 % по сравнению с 2007 г. Также по долгосрочной программе развития Российской Федерации до 2020 г. планируется преодоление энергетических барьеров роста, в том числе за счет повышения энергоэффективности и расширения использования альтернативных видов энергии при сохранении тенденции к удорожанию энергоносителей. Кроме того, включается масштабное внедрение новых ресурсосберегающих технологий в электроэнергетике (включая чистые угольные технологии), расширение производства электроэнергии на атомных электростанциях.

К перечисленным выше документам можно добавить Государственную программу Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергети-

ки», утвержденную 15 апреля 2014 года в целях развития энергосбережения, надежного обеспечения страны топливно-энергетическими ресурсами, повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, снижения антропогенного воздействия топливно-энергетического комплекса на окружающую среду [2].

Добиться стоящих результатов в направлении эффективного использования энергии возможно в большей мере только с использованием инновационных составляющих. На всех стадиях получения, транспортировки и использования энергии должна осуществляться эффективность. Большинство государств мира стремится к рациональному и экологически правильному использованию энергетических ресурсов. Так, например, в Великобритании на некоторых предприятиях успешно применяется система целевого энергетического мониторинга, а в Европейском Союзе в то же время успешно реализуются следующие рыночные механизмы:

- система «зеленых» сертификатов, которая направлена на стимулирование компаний к использованию возобновляемых источников энергии;
- система «белых» сертификатов, которая объединяет в себе стимулирование к сокращению потребления энергетических ресурсов и выбросов парниковых газов [3].

Так, энергоемкость ВВП Европы в целом с 252 кг/1000 долл. в 2000 г. снизилась до 179 в 2010 г. [1]. Данная система могла бы быть полезной для России. Она может помочь решить целый комплекс взаимосвязанных вопросов: сокращение вредных выбросов, развитие энергии на основе возобновляемых источников, стимулирование развития рынка энергосервисных услуг, разработка инновационных подходов к энергоэффективности и многие другие.

В современном мире успешно используются такие источники энергии, как солнечные батареи, мини-ГЭС, биогазовые установки, ветрогенераторы. Люди стремятся использовать альтернативные источники для максимального результата получения энергии из возобновляемых ресурсов.

В уменьшении энергоемкости ВВП для России существуют некоторые сложности. Можно назвать следующие: снижение энергетической безопасности России и ее регионов из-за отсутствия возможностей покрыть потребности экономики в энергии; снижение шансов на успешную реализацию реформ и национальных проектов из-за отвлечения большого количества средств на энергообеспечение и энергоэффективность; рост нагрузки по оплате энергоносителей на семейные бюджеты, сохранение высокого уровня бедности в стране; необходимость масштабных инвестиций в топливно-энергетический комплекс, что повлечет за собой рост тарифов и другое [4].

На данном этапе жизни общества энергоэффективность становится одним из важнейших ресурсов для дальнейшего успешного развития государства. Более рациональное эффективное производство и использование энергии, инновационные разработки, обновление инфраструктуры являются важнейшими направлениями роста экономики нашей страны. В Российской Федерации создается устойчивая нормативная база, регулирующая направление энергоэффективности, больше внимания уделяется финансированию данной сферы. До

недавнего времени в нашей стране вопросам развития использования возобновляемых источников энергии уделялось мало внимания. Однако ситуация меняется, так как правительство намерено бороться за лучшую экологию и повышение качества жизни людей, развитие технологий. У населения нашей страны отсутствует стремление к энергоэффективности. Однако существуют инструменты, действие которых способно повлиять на общество. Например, можно перенять опыт завода «Ровер» в Великобритании, на котором работников стимулируют премиями, проводят конкурсы на лучшие предложения по энергоэффективности, что развивает дух соревновательности, который дает результаты и снижает издержки на использование электроэнергии в производстве.

#### Список литературы

1. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации до 2020 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/194365/> (дата обращения: 24.10.2014).
2. Энергоэффективность и развитие энергетики: государственная программа Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.minenergo.gov.ru/upload/iblock/4d8/4d87a15706a97a0684f05bf306c5b5f4.pdf> (дата обращения: 24.10.2014).
3. Башмаков И. Российский ресурс энергоэффективности: масштабы, затраты и выгоды // Вопросы экономики. 2009. № 2. С. 71–89.
4. Бернер М. С., Лоскутов А. В. Зарубежный опыт мотивации энергосбережения // Энергосбережение. 2008. № 3. С. 44–48.
5. Энергоемкость валового внутреннего продукта. Единая энергетическая система Евразийского экономического сообщества [Электронный ресурс]. URL: <http://www.eeseaec.org/contact-us/pokazateli-energeti> (дата обращения: 24.10.2014).

УДК 62-71

Хасанова Р. В., Демин Ю. К., Картавец С. В.  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова  
rezed@list.ru

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АЗОТНОГО КОМПРЕССОРА

Современное кислородное производство является энергоемким и широко использует для технологических и хозяйственных потребностей электрическую и тепловую энергию. Удельный вес энергетических затрат в себестоимости криогенных продуктов составляет 50–90 % [1]. В черной металлургии широко применяются продукты разделения воздуха, например, кислород – для выплавки стали в кислородных конвертерах и производства чугуна, азот – при плазменно-дуговой резке, наплавке и сварке металлов [2].

Стоит отметить, что затраты энергии на сжатие воздуха и продуктов его разделения в воздухоразделительных установках (ВРУ) составляют до 90 % всех энергозатрат установки.

Как правило, в составе ВРУ находятся мощные центробежные компрессоры. Давления, создаваемые компрессорами, которые работают в технологических схемах производств, достигают больших значений. Однако получение высокого давления в одной ступени компрессора затруднительно. Причиной этого является чрезмерное повышение температуры в конце сжатия, обусловленное невозможностью создания конструкции компрессора с достаточно интенсивным отводом теплоты от сжимаемого газа. Поэтому для более интенсивного охлаждения газа в процессе сжатия применяют промежуточные охладители [3]. В таком случае из-за недоохлаждения сжимаемого газа до заданной температуры идет перерасход энергии на привод компрессора.

В работе [4] было предложено для уменьшения недоохлаждения сжимаемого газа между ступенями – в дополнение к выносному промежуточному охлаждению – осуществить впрыск жидкого кислорода или азота в поток охлаждаемого газа на входе в ступень сжатия.

Для оценки эффективности работы реального компрессора к расчету были приняты следующие характеристики азотного турбокомпрессора АЭРОКОМ АА-259/31А (см. таблицу).

Основные технические данные и характеристики компрессора

Наименование технической характеристики	Единица измерения	Значение
Давление начальное, избыточное	МПа	0,0033
Объемная производительность по условиям всасывания	м <sup>3</sup> /ч	15540
Давление конечное, избыточное	МПа	3,0
Температура газа начальная, не более	°С	30
Температура газа конечная, не более	°С	45
Расход химический очищенной воды, не менее	м <sup>3</sup> /ч	234
Мощность приводного электродвигателя	кВт	3150
Температура химически очищенной воды на входе, не более	°С	37
Мощность, потребляемая компрессором	кВт	2487
Количество ступеней сжатия	–	6
Количество выносных газоохладителей	–	4

Таким образом, принимается, что азот поступает в первую ступень компрессора, сжимается, затем входит в промежуточный газоохладитель. Перед второй ступенью компрессора производится впрыск жидкого азота в поток сжимаемого газа. Аналогично происходит для следующих трех ступеней. В результате предложенного мероприятия жидкий азот воспримет теплоту сжатого азота, испарится и нагреется от температуры насыщения до температуры газообразного азота на выходе из промежуточного газоохладителя, а сжатый азот охладится до требуемой температуры.

Для оценки энергосберегающего эффекта от впрыска жидкого азота были проведены расчеты по определению выигрыша в работе по сжатию вследствие уменьшения значения недоохлаждения. Сжатие в компрессоре было принято адиабатным.

На рис. 1 показано количество жидкого азота, требуемого для ликвидации недоохлаждения, при этом в среднем необходимо 0,203 кг/с жидкого азота.

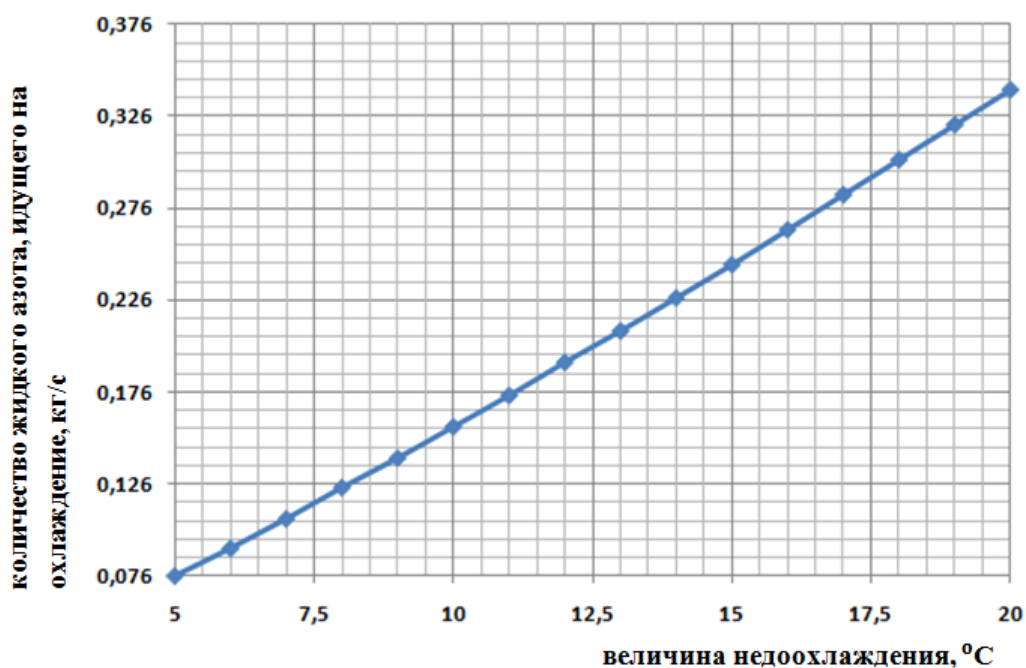


Рис. 1. Зависимость необходимого количества жидкого азота для впрыска от величины недоохлаждения

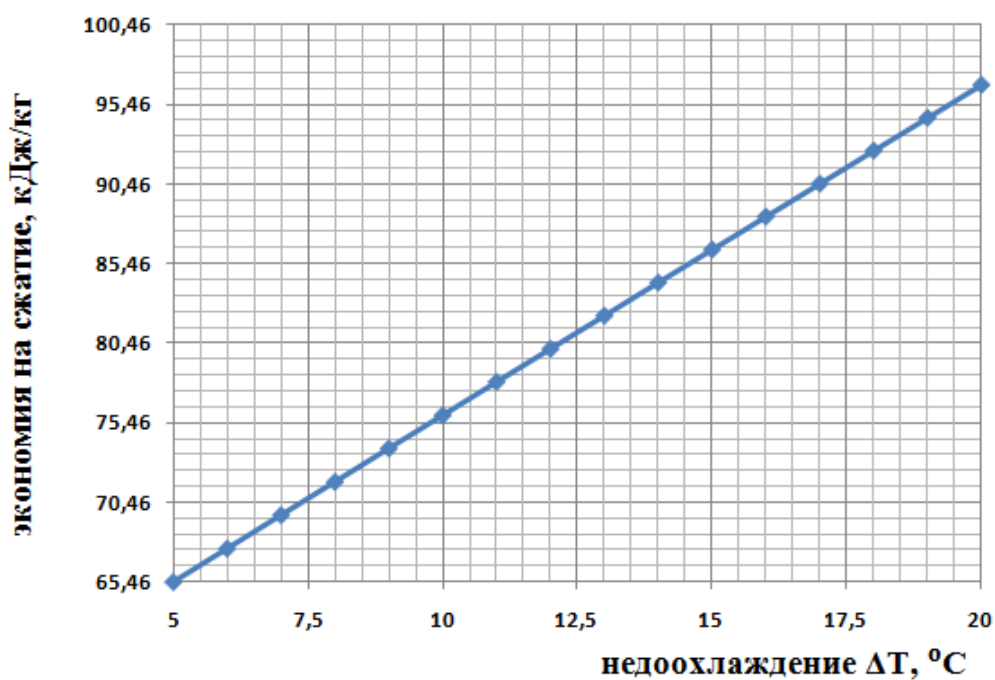


Рис. 2. Зависимость удельной экономии энергии на сжатие при впрыске жидкого азота, кДж/кг сжатого азота

Из рис. 2 можно сделать вывод, что при впрыске жидкого азота с ростом величины недоохлаждения увеличивается удельная экономия энергии на сжатие, т. е. чем больше величина недоохлаждения, тем больший энергосберегающий эффект дает впрыск жидкого азота. Для рассмотренного компрессора эффект может составить более 95 кДж/кг сжатого азота.

#### Список литературы

1. Оконский И. С., Осокин А. А., Федюков Ю. С. Процессы и аппараты кислородного и криогенного производства М. : Машиностроение, 1985. 256 с.
2. Глизманенко Д. Л. Получение кислорода / 5-е изд., перераб. и доп. М. : Химия, 1972. 752 с.
3. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М. : Энергия, 1984. 416 с.
4. Метод теплового контроля для энергосберегающих технологий в металлургической промышленности / Хасанова Р.В. [и др.] // Энергосберегающие технологии в металлургической промышленности : материалы всероссийской молодежной конференции. М. : МИСИС, 2014. С. 184 –187.

УДК 621.3

Хасанова Р. О., Шарифуллина А. Р., Матвеев С. В., Картавец С. В.  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова  
matveev\_s\_@inbox.ru

### АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ СНИЖЕНИЯ РАСХОДОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В настоящее время порядка 500 млн. т стали выплавляется в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) [1]. Для расплавления 1 т стали теоретически необходимо 1400 МДж тепловой энергии или 389 кВт·ч электрической, но в реальности потребляется около 750 кВт·ч/т [2].

С технологической точки зрения получаемая сталь из металлолома различных марок имеет низкое качество. Для выравнивания качества технологи-металлурги предложили вводить в ДСП некоторое количество жидкого чугуна с добавлением кислорода (рис. 1).

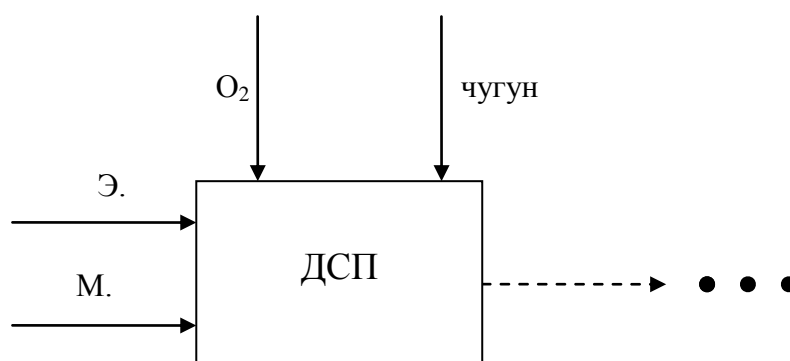


Рис. 1. Принципиальная схема входящих материальных (М.) и энергетических (Э.) потоков ДСП

Такое технологическое мероприятие позволило сократить потребление электроэнергии из внешних сетей. Электроэнергия, поступающая от ТЭС, ГРЭС, КЭС и т. п., транспортируется до ДСП со значительными потерями в электросетях (до 9 %), что приводит к ее удорожанию. Итак, введение в ДСП

чугуна с кислородом позволило технологам сократить количество потребляемой дорогой электроэнергии. Постепенно данное мероприятие указало направление по снижению потребляемой электроэнергии в ДСП. Обзор научно-технической литературы [3] позволил получить зависимость потребляемой электроэнергии ДСП от доли внесенного чугуна для различных металлургических предприятий России.

Зависимость потребления электроэнергии от доли внесенного чугуна для различных металлургических предприятий России

Предприятие	Расход	
	электроэнергии, кВт·ч/т	чугуна, кг/т
ММК	274,0	334,0
ЧерМК	293,3	310,5
Уральская сталь	265,8	428,6
ЕВРАЗ ЗСМК (промплощадка № 2)	432,5	229,6
ЧелМК	392,8	307,4
МЗ им. А.К. Серова	351,9	371,1
МЗ «Красный Октябрь»	470,0	1,6
Электросталь	790,4	6,7
Ижсталь	459,8	4,5
Златоустовский МЗ	869,1	4,6
СТЗ	468,5	9,4

На основе данных таблицы была построена зависимость снижения расхода электроэнергии от доли внесенного чугуна (рис. 2). Из рис. 2 видно, что при доле внесенного чугуна порядка 43 % количество электроэнергии, потребляемой ДСП, снизилось до 265,8 кВт·ч/т и имеет устойчивую тенденцию к снижению.

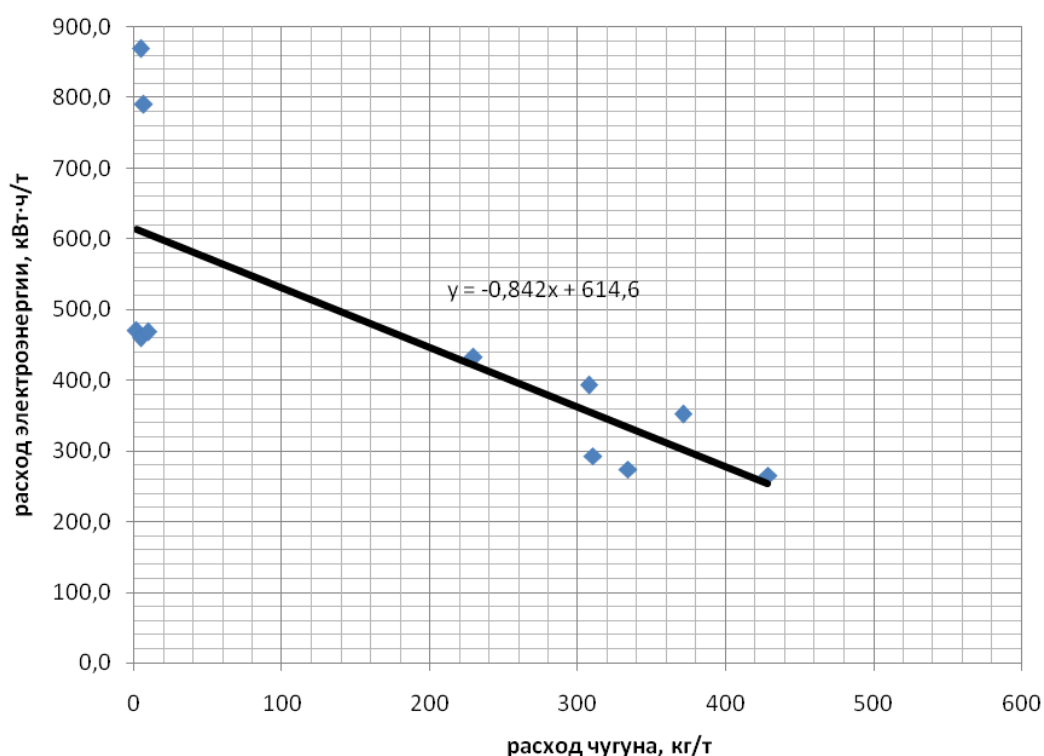


Рис. 2. Зависимость снижения расхода электроэнергии от доли внесенного чугуна

При такой организации процесса на выходе из ДСП получают жидкую сталь с температурой порядка 1600 °С (рис. 3).

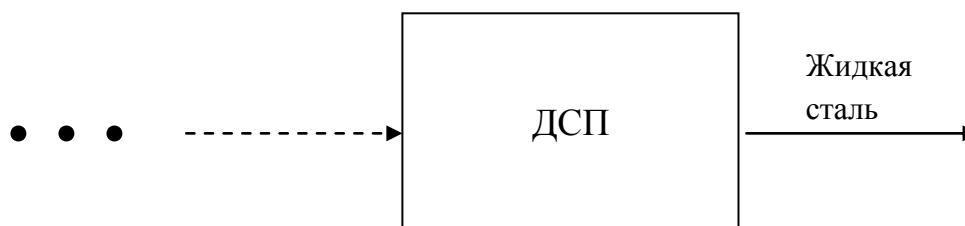


Рис. 3. Принципиальная схема исходящих материальных потоков ДСП

Каждая тонна содержит в себе 1400 МДж (389 кВт·ч, линия 1 на рис. 4) тепловой энергии, которая полностью отводится в окружающую среду с водой и воздухом на температурном уровне, не превышающем 100 °С в последующих переделах (разливка, прокатка). В более ранних работах были предприняты попытки использования тепловой энергии разливаемой стали [4] для генерации электроэнергии с применением жидкометаллических теплоносителей (ЖМТ) [5]. В результате с учетом КПД паротурбинного цикла порядка 40 % с каждой тонны разливаемой стали можно сгенерировать  $389 \cdot 0,4 = 155$  кВт·ч (линия 2 на рис. 4) электроэнергии. Полученную электроэнергию можно направить обратно в ДСП.

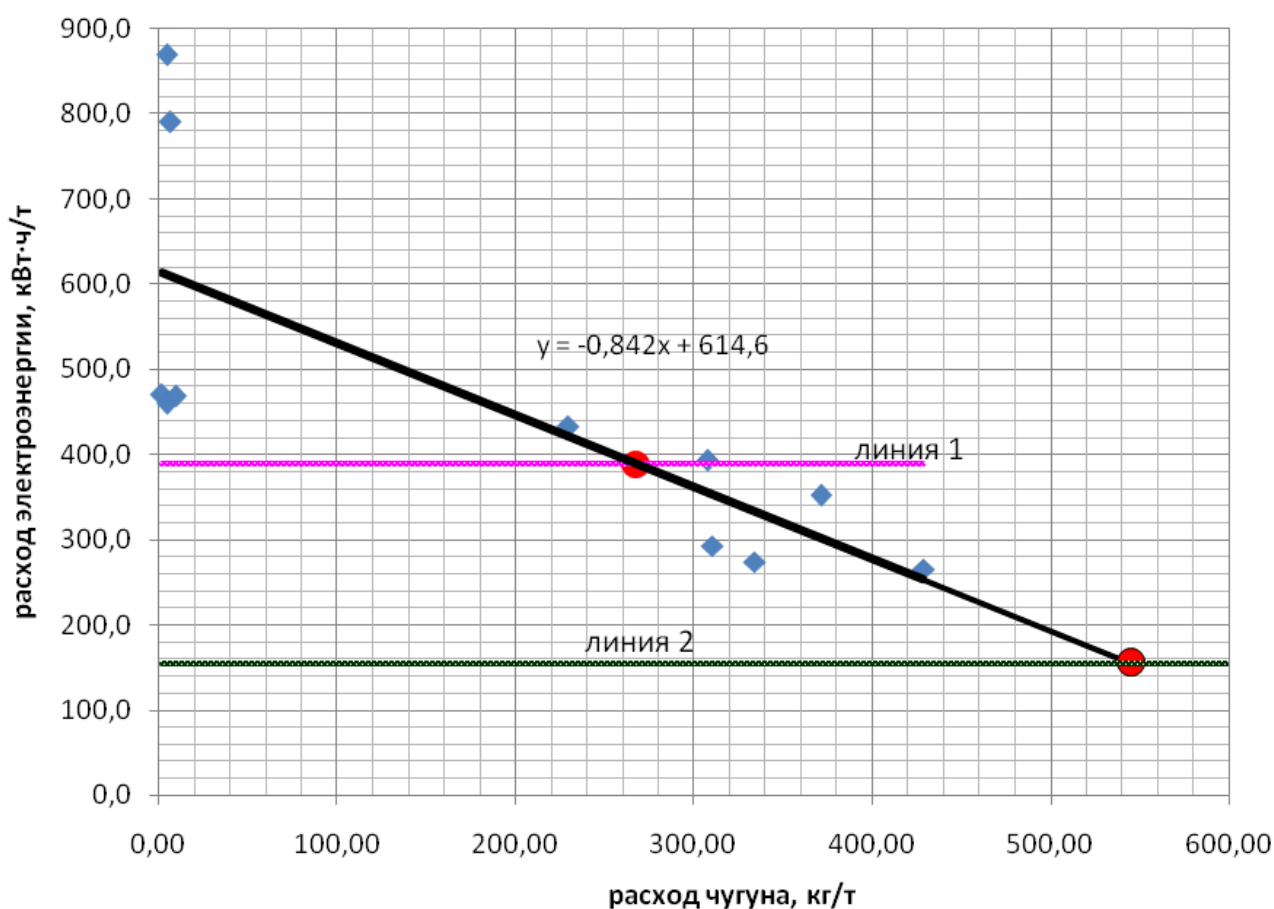


Рис. 4. Зависимость снижения расхода электроэнергии от доли внесенного чугуна



Таким образом, анализ данных по расходу электроэнергии в зависимости от доли внесенного чугуна для различных металлургических предприятий России выявил тенденцию к стремительному уменьшению потребления электроэнергии, приближающуюся к линии 2 (регенерируемой электроэнергии, полученной на теплоте жидкой стали после ДСП). Итак, при доле внесенного чугуна 55 % количество потребляемой электроэнергии для ДСП снижается до 155 кВт·ч/т, что позволяет полностью обеспечить это количество за счет теплоты жидкой стали, разливаемой после ДСП, и создать таким образом электросталеплавильный процесс без внешнего потребления электроэнергии.

#### Список литературы

1. World crude steel output increases by 6.8% in 2011 [Электронный ресурс]. URL: <http://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2012/2011-world-crude-steel-production.html> (дата обращения: 23.10.2014).
2. Картавцев С. В. Интенсивное энергосбережение и технический прогресс черной металлургии. Магнитогорск : МГТУ, 2008. 311 с.
3. Строгонов К. В., Картавцев С. В. Жидкая сталь: использование теплоты и скоростная разливка. Магнитогорск : МГТУ, 2006. 147 с.
4. Теплота жидкой стали – источник электроэнергии для дуговых сталеплавильных печей. Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. М. : МИСиС, 2014. С. 299–303.
5. Катунин В. В., Петракова Т. М. Основные показатели работы черной металлургии России в 2012 г. // Черная металлургия. 2013. № 4. С. 3–18.

УДК 662.95

Хомяков А. Л.  
Вятский государственный университет (г. Киров)  
20cent@inbox.ru

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ГАЗОВЫХ КОТЛАХ МАЛОЙ ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Высокие темпы газификации регионов Российской Федерации делают все более доступным индивидуальное теплоснабжение потребителей в малых населенных пунктах. Наиболее эффективным и распространенным источником тепла в газифицированных районах является газовый водогрейный котел.

В настоящее время существует большое количество моделей газовых котлов, работающих по разным принципиальным схемам.

В котлах с открытой камерой сгорания (рис. 1) воздух, необходимый для горения топлива, забирается из помещения и удаляется в атмосферу с помощью тяги, создаваемой дымовой трубой. Недостатки этого способа вполне очевидны: увеличение расхода тепла на подогрев воздуха, необходимого для горения, устройство системы вентиляции для подачи воздуха в помещение, а также

необходимость установки дымовой трубы. Зачастую стоимость установки и затем последующей эксплуатации дымовой трубы вызывают особые сложности. Также существенный недостаток – влияние режима работы вентиляции на работу котлов.

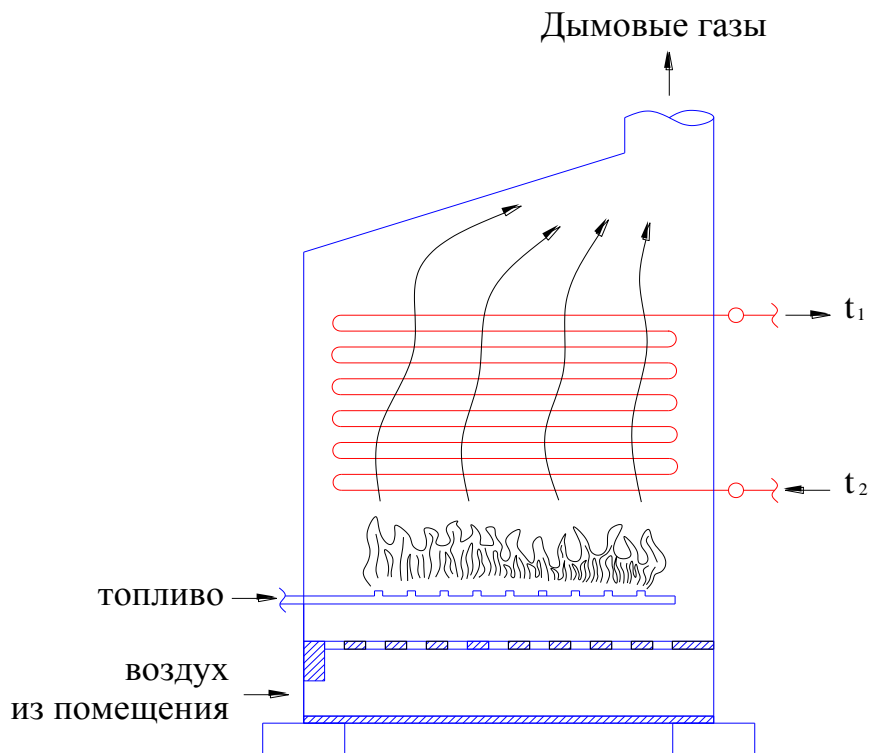


Рис. 1. Схема котла с открытой камерой сгорания

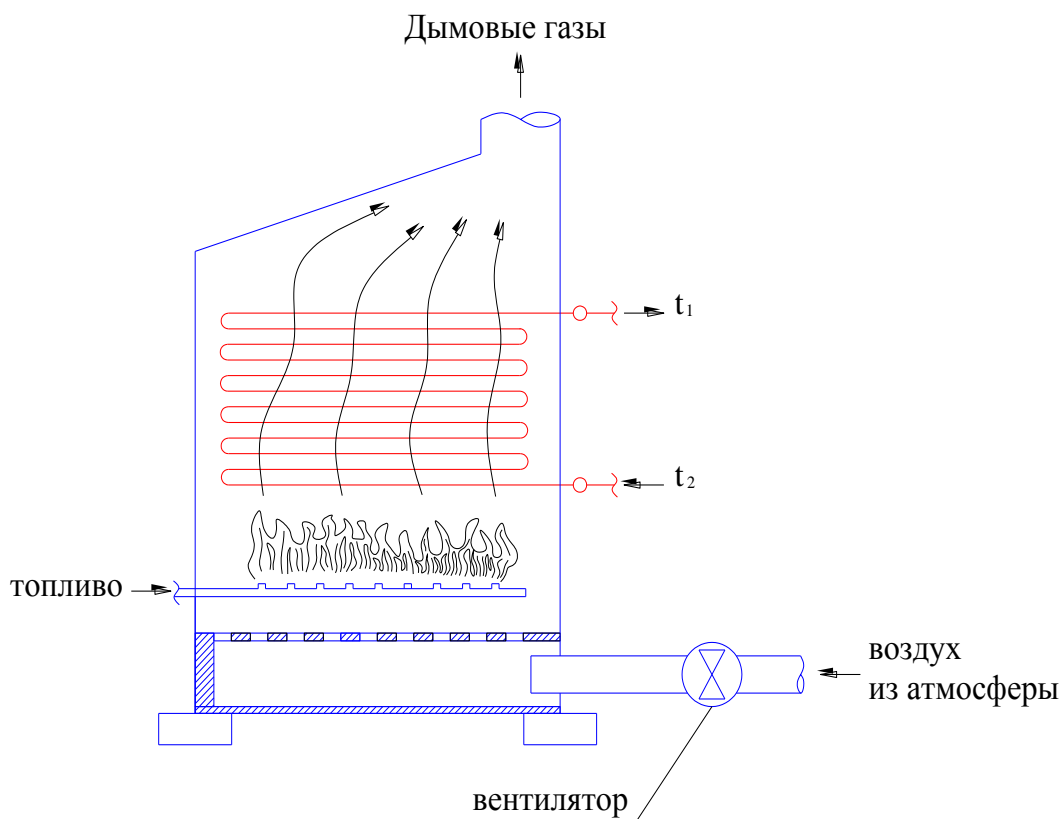


Рис. 2. Схема котла с закрытой камерой сгорания

Большинство этих проблем отсутствует в котлах с закрытой камерой сгорания (рис. 2). В таких котлах воздух, необходимый для горения топлива, забирается из атмосферы специальным вентилятором, а затем подается к горелкам. В данной схеме повышается надежность сгорания топлива, но вместе с тем возрастает расход электроэнергии, необходимой для привода вентилятора. Как показывают практические данные, в большинстве случаев количество электроэнергии, затрачиваемой на принудительную подачу воздуха, компенсируется уменьшением потребления тепла на нагрев подаваемого воздуха.

В целях дальнейшего увеличения эффективности работы котлов с закрытой камерой сгорания была предложена схема коаксиальной системы дымоходов (рис. 3). Данная система реализуется по схеме «труба в трубе»: во внутренней трубе движутся удаляемые дымовые газы, а в зазоре между внешней трубой и внутренней движется подаваемый к горелкам воздух. При такой схеме организации движения происходит нагревание подаваемого воздуха за счет теплоты уходящих газов. Движение воздуха и уходящих газов осуществляется по схеме противотока, что дополнительно увеличивает количество передаваемого тепла.

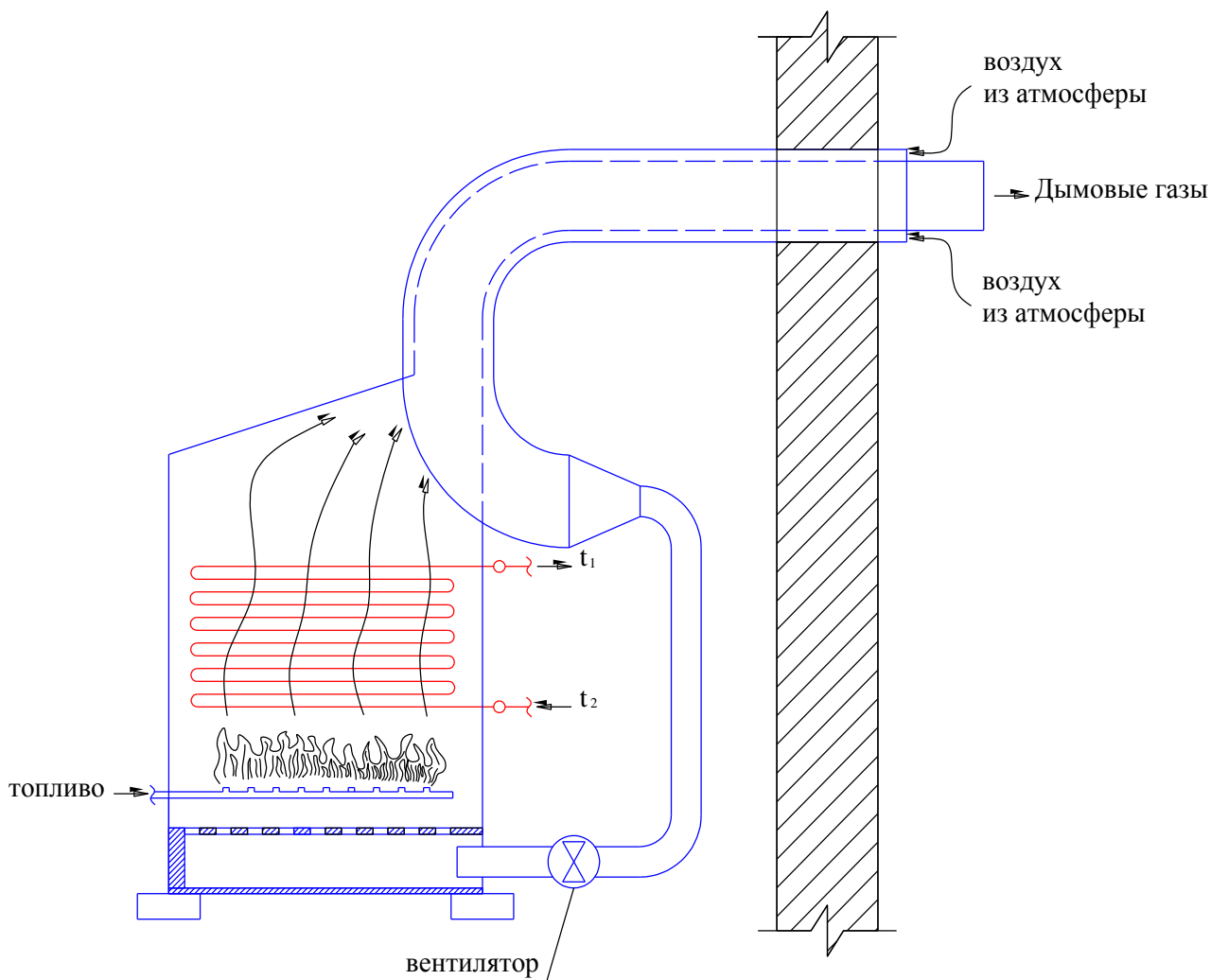


Рис. 3. Схема котла с закрытой камерой сгорания и коаксиальным дымоходом

По своей сути организация движения воздуха и уходящих газов в коаксиальном дымоходе эквивалентна работе воздухоподогревателей, широко используемых в котлах большой мощности. Дополнительное использование теплоты уходящих газов увеличивает КПД котельного агрегата и уменьшает удельный расход топлива на выработку тепловой энергии.

Газовые котлы с коаксиальной системой дымоходов нашли свое применение в бытовых водогрейных котлах малой мощности и широко используются в продукции зарубежных фирм-производителей котельного оборудования.

УДК 620.9

Худякова Г. И., Щелоков Я. М.  
Уральский федеральный университет,  
НП СРО «Союз «Энергоэффективность»  
energo-ugtu@bk.ru.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ КАК ОБЪЕКТИВНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ

В части обеспечения устойчивого экономического роста, энергоэффективность в РФ во многом остается спорным тезисом. То ее объявляют непременным условием экономического развития, то переводят на уровень добровольности для одних слоев общества, а для других слоев наделяют статусом значимого информационного ресурса.

*Движущая сила.* Что отличает экономику от большинства других сфер жизни? Независимо от типа регулятора экономических взаимоотношений (рынок, государственная монополия, естественная монополия и др.), идеологическая основа остается неизменной – это обеспечение сохранения *доверия* ко всем участникам процесса. Особенно это актуально в энергообеспечении, так как энергетика как вид экономической деятельности напрямую влияет на устойчивость социальной среды, электоральных настроений, да экономики в целом. Поэтому вряд ли можно обойтись без идеологии «движущей силы» при использовании энергоресурсов в любом секторе экономики и управления и в повседневной жизни.

Официальная идеология энергосбережения (повышение энергетической эффективности) прописана в нескольких федеральных законах (261-ФЗ, 399-ФЗ, 384-ФЗ, 339-ФЗ и др.), в многочисленных подзаконных актах, а также в национальных стандартах и сводах правил. Все эти три уровня нормативных документов нередко противоречат друг другу. Одна из причин этого кроется в отсутствии общей концепции по их разработке при учете интересов всех сторон. Из них следует обратить внимание на две сферы: бюджет и малый бизнес. Проблему бюджета была попытка (в законе 261-ФЗ) решить за счет введения обязательности энергетических обследований. Однако закон 399-ФЗ от 28.12.2013 отменил эту обязательность. Так и не состоялась, несмотря на всю

свою очевидность, система энергетического сервиса. Как говорится, жизнь в очередной раз оказалась, и на этот раз, сложнее половинчатой экономической схемы. Ну а что же с малым бизнесом, без которого, как и без бюджетной сферы, невозможно обойтись в современной экономической системе? Ни в одном из этих ФЗ, постановлений Правительства РФ (ПП) нет статьи, тем более главы, где бы просто упоминалась такая сфера экономики, как малый бизнес. Косвенно из текста закона 261-ФЗ можно понять, что для малого бизнеса энергосбережение – это добровольный экономический процесс. Таким образом, малый бизнес, по сути дела, оставили вне сферы официальной идеологии повышения энергоэффективности. Поэтому для этого, казалось бы, судьбоносного экономического сословия инициативно формируется своя идеология. Полагается, чтобы идеи энергосбережения надолго овладели массами, достаточно двух мотиваций: ограничения в потреблении энергии и [или] деньги. У этих мотиваций есть явные нестыковки.

Ограничения, тем более в потреблении энергии, работают, если они для всех, включая тех, кто вводит эти ограничения. В нашей же стране с самым богатым ресурсным потенциалом, идеология локальных ограничений только для потребителей может вызывать как минимум раздражение. Пример – итоги работы выставки Иннопром – 2013 (Екатеринбург).

К чему привели подобные выборочные ограничения в России:

- тарифы на энергоресурсы стали уже неконкурентоспособны с зарубежными странами (при принятии решений о территориальном размещении производств);

- условия технологического присоединения к сетям, условия и сроки для открытия новых производств не способствуют развитию промышленности и бизнеса, в том числе в сравнении с зарубежными площадками и др.

Как следствие, наблюдалось выведение и [или] приобретение (пока олигархами) основных фондов промышленности за пределы РФ, т. е. создание рабочих мест и добавленной стоимости в других государствах. Напомним, что промышленный малый бизнес в массовых масштабах не может существовать сам по себе. Выходит, что и малому бизнесу тоже пора убираться за рубеж, если бы не события начала 2014?

Деньги – это удобный (но не объективный) эквивалент всему и вся, тем более в наше либеральное время, когда деньги предпочитают вкладывать в недвижимость. А сколько их напрямую утекает за рубеж, т. е. туда, где они на хозяина работают сразу, как дрожжевое тесто, или обретают более надежную гавань? Для справки: в 2002–2011 гг. из России незаконно вывели 880,96 млрд долл. сообщает американский фонд *Global Financial Integrity (GFI)*.

Альтернативную мотивацию, на первый взгляд, более реальную многие находят в самом определении эффективного использования энергетических ресурсов – достижение экономически оправданной эффективности использования энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологий и соблюдения требований к охране окружающей среды. Отсюда следует, что опять именно классическая (финансовая) экономическая эффективность, а

не что-либо другое, является основной движущей силой энергосбережения? Однако экономическая эффективность в любом сословии своя была и будет. Именно по этой причине вся практика экономической деятельности показывает, что «экономическая оправданность» не может существовать, тем более определять тренд любого развития, если нет как единых условий сопоставимости достигнутых результатов, так и безусловно работающих поощрений и ограничений на законодательном уровне, иначе будут перекосы, вплоть до злоупотреблений. *Поэтому и в энергосбережении складывается неоднозначность как одна из неизбежностей нашего бытия.* В мировой практике нередко предлагается в качестве выхода из этой ситуации правило: цены на энергетические товары для конечных потребителей являются основным критерием для оценки деятельности производителей энергоресурсов.

Возможен ли в нашей ситуации выход из этого замкнутого круга экономических эквивалентов, экологических ограничений, рыночных рычагов, которые у нас почему-то в руках «естественных» монополий, проще говоря, «естественно монопольных рыночных рычагов». Даже, если рынок энергосбережения сложился в таком нетрадиционном формате, ему не обойтись без экономической эффективности.

Чтобы обосновать конкретное мероприятие, следует знать затраты на производство единицы энергии. Именно с этого показателя начинается оценка экономически оправданной эффективности мероприятия, наилучшей доступной технологии (НДТ) и др. На языке классической экономики это называется величиной замыкающих, т. е. народнохозяйственных затрат на производство конкретного вида энергоресурса. Это было тогда, когда был один хозяин, по имени «государство», т. е. бюджетная сфера. И как бы не было необходимости в малом бизнесе. Тем не менее следует рассмотреть этот классический вариант, когда все были очень условно, но «равны». Основой такого равенства была низкая «бесплатная» цена энергоресурсов. Цитируем здесь, применительно к электроэнергии, текст, у которого сейчас трудно найти первоисточник.

Ресурсосберегающие программы у потребителей (покупателей) уменьшают объем производства для любой, в том числе и прогрессивной энергоснабжающей компании. Воздействие ресурсосбережения на тариф определяется соотношением замыкающих и средних затрат на производство. Если замыкающие затраты выше средних издержек, то энергосбережение ведет к снижению тарифа. Такая ситуация характерна для дефицитных энергосистем, поскольку в их положении происходит экономия самых больших капитальных расходов, вызванных строительством дополнительных мощностей. При наличии уже достаточного количества генерирующих мощностей или возможности увеличения импорта энергоресурса, снижение объемов производства, наоборот, ведет к росту тарифа.

Несмотря на регулярные попытки введения отдельных обязательных требований к показателям энергоэффективности при использовании ТЭР, организационные, режимные, мало- и средnezатратные энергосберегающие мероприятия по-прежнему реализуются на добровольной основе. Поэтому с точки зрения

повышения эффективности использования энергии потребители делятся на две категории: активных участников по реализации программ и неучастников, точнее, пассивных участников. В наше время это в основном бюджетная сфера и малый бизнес. Поскольку активная реализация энергосберегающих мероприятий влияет на тариф, постольку действия активных участников влияют на величину тарифа и для пассивных участников при использовании ТЭР. Таким образом формируются разные позиции, исходя из которых можно оценивать энергосберегающие мероприятия. Вся эта действительность сводится к следующей упрощенной схеме.

С позиции *государства* эффективность энергосберегающих мероприятий оценивается исходя из минимизации суммарных затрат всех участников. Другими словами, при реализации ресурсосберегающей стратегии развития энергосистемы критерий оценки не совпадает с оптимумом тарифа для конечного потребителя. С позиции потребителя (*активный участник*) экономическая оправданность подразумевает, что дополнительные капитальные затраты на приобретение эффективного оборудования по крайней мере окупаются за счет экономии эксплуатационных издержек за период использования оборудования. С позиции *энергоснабжающей организации* эффективность тренда на энергосбережение определяется соотношением прибыли, которую компания может заработать в результате увеличения объемов производства энергоресурсов, с прибылью, получаемой компанией благодаря реализации энергосберегающих мероприятий. Как правило, цена электроэнергии выше краткосрочных замыкающих затрат, а условно-постоянные затраты в составе этой цены покрываются при производстве планового объема энергоресурса. Следовательно, в случае сохранения плановых показателей отказ от производства сверхплановой продукции лишает поставщика дополнительной прибыли. Отсюда понятно отношение энергоснабжающей компании к энергосбережению, хотя его можно изменить, если *государство* способно своевременно ввести соответствующие методы регулирования, т. е. *государство* при таком подходе обязано постоянно следить за регулируемыми организациями, а у каждой из них свои условия функционирования. Реально ли такое? Остается одно – привлечь к этому потребителя в первую очередь население.

С позиции *пассивного участника* можно говорить о том, что его положение не должно ухудшаться в результате реализации энергосберегающей политики, т. е. тариф на энергоресурс при развитии энергосистемы за счет повышения эффективности использования энергии у потребителя должен быть не выше, чем при развитии на основе увеличения генерирующих мощностей. Выходит, что неоднозначность в энергетике (энергосбережении), тем более при сохраняющемся обязательном делении ее по структуре на производителей (поставщиков) и потребителей есть и будет сохраняться. Как размотать этот клубок интересов? Что предлагалось и предлагается.

Все сводилось и сводится к тарифу, а именно к тому, что при проведении ресурсосберегающей политики не следует стремиться к уменьшению тарифов. Это влечет за собой непрерывный их рост. Если энергосбережение экономиче-

ски обосновано, то у активного участника, несмотря на рост тарифов, общие расходы на энергетическую услугу будут сохраняться, а у особенно способных – уменьшаться. Поэтому в качестве критерия оптимальности следует использовать не тарифы, а общие расходы на предоставление энергетических услуг, в которые входят как затраты на прирост генерирующих мощностей, так и затраты на реализацию мероприятий по повышению энергетической эффективности. Учитывая, что это все на уровне «благих пожеланий», энергоснабжающие организации выбирают затраты на прирост генерации. Сейчас это исключительно затратное мероприятие, а источник их финансирования остался один – это потребитель, кем бы он не был: олигархом, бюджетником или мелким предпринимателем, пока и есть вынужденный тренд ограничения этой нагрузки для населения.

При неизбежном в таком раскладе росте тарифов рекомендуется помнить о соблюдении интересов социально незащищенных групп потребителей: пенсионеров, многодетных и малообеспеченных. Это достигается путем реализации специальных программ, нацеленных на данных потребителей, снижающих их расходы на энергию. Как это соблюдается у нас – отдельная тема, которая сводится к «социальному нормативу», опять же общему для всех.

В представленном выше описании экономических отношений существующая система энергоснабжения напрямую влияет на экономические показатели предприятий, которые являются только потребителями ТЭР, т. е. без собственной генерации. При этом реально реагировать на непрерывный рост тарифов могут только потребители из числа активных участников, если им проблемы энергосбережения удастся экономически обоснованно решать за счет привлечения коротких денег. Использование долгосрочных инвестиций возможно только при наличии производства высоколиквидной продукции. В итоге сложилась схема, в которой энергетический бизнес является монополистом в своей сфере и располагает высоколиквидным товаром, реализуемом по малоуправляемым тарифам. Потребители энергоресурсов функционируют в высококонкурентной среде, в которой непрерывно надо снижать свои издержки и [или] обновлять свою продукцию. Теперь еще в рамках санкций. Возникает вопрос, есть ли место в такой среде для малого бизнеса? И если есть, то, при каких условиях.

Вероятно, такое и возможно, но при условии, когда в энергосбережении при выборе движущей силы будут равны все стороны экономического процесса. Речь здесь идет о равенстве всех форм собственности в энергетике как виде экономической деятельности, в которой ряд энергетических товаров имеют монопольную природу, тогда и у субъектов бюджетной сферы появится интерес к праву выбора заниматься им энергосбережением или предоставлять информацию об энергосбережении.

После принятия закона 399-ФЗ именно информация об энергосбережении стала одним из ключевых предложений со стороны государства при поиске решений по урегулированию конфликта интересов всех заинтересованных *сторон*, участвующих в процессе энергосбережения и повышения энергетической



эффективности. Несмотря на всю значимость информационных процессов, может ли «информация об энергосбережении» быть идеологией «движущей силы» при использовании энергоресурсов. В заметной мере да, если система сохраняет или приобретает возможность саморегулирования, что возможно только при наличии обратной связи.

Из всего сказанного следует выделить три принципа, реализация которых позволит обеспечить энергетическое равновесие (сохранение *доверия* ко всем участникам процесса) в конфликте интересов *сторон*, участвующих в процессе энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

*Принцип равенства.* При столь значительном количестве *сторон*, участвующих в процессе энергетического производства и потребления, нельзя обойтись без сохранения принципа равенства, у которого базовая основа сложилась к настоящему времени как обеспечение равноправного доступа всех *сторон* к системе энергоснабжения. В таком случае появляется основа для реального участия всех *сторон* в процессе регулирования цен (тарифов) на энергоресурсы.

*Принцип ценообразования* Данный принцип заключается в выборе правил регулирования тарифов. В мировой практике сложилось правило, предложенное Мировым энергетическим советом, что цены на энергоресурсы для конечных потребителей являются основным критерием для оценки деятельности производителей энергоресурсов. В нашем же случае любой вариант регулирования тарифов приводит к их непрерывному росту, причем возможности конечного потребителя влиять на этот процесс практически полностью отсутствуют.

*Конкурентная цена (ставка).* Пример из международного энергетического права. Общие нормы закона против ограничения конкуренции и специальные нормы закона об энергетическом хозяйстве относительно недискриминационного и прозрачного доступа к сетям обеспечивают соблюдение принципов справедливого гражданско-правового согласия при заключении договора. Масштабом для государственного контроля является цена, которая бы имела место в условиях реальной конкуренции (так называемая гипотетическая конкурентная цена), т. е. тариф на энергоресурс не есть производная от инфляционной составляющей, как это у нас именно в том виде, которая по природе своей любые цены превращает в бесконечность.

Важным следствием здесь является следующее. Все эти три принципа есть единое целое и не могут существовать сами по себе без упомянутой выше обратной связи. Примерами такой обратной связи являются:

- реально работающая система энергетического сервиса, которая осталась вне рамок закона 399-ФЗ;
- обязательность участия населения в учете и регулировании расхода энергоресурсов на коммунальные нужды, что вообще не рассматривается.

## **ОБЗОР СПОСОБОВ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОНАСОСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ГОРОДСКИХ ОБЪЕКТОВ**

В нашей стране развитие теплонасосной энергетики находится на начальном этапе, поэтому вопрос выбора источника низкопотенциального тепла и потребителя здесь наиболее актуален, ведь установка любого теплового насоса должна приносить максимальный экономический эффект. Только экономически выгодные технологии имеют будущее для своего развития, установка теплового насоса в неправильном месте для неоправданных потребителей может создать плохую репутацию теплонасосным технологиям.

В городской черте традиционное применение тепловых насосов для отопления зданий с забором тепла из грунта, грунтовых вод или водоема имеет много проблем, которые фактически тормозят развитие их применения в городах России. Отопление с помощью теплонасосных установок (ТНУ), характерных для города, крупных зданий, требует значительных объемов забора тепла от низкопотенциальных источников, что весьма проблематично в плотно застроенной городской среде. Более того, повсеместное применение в крупных городах центрального отопления создает неподъемную конкуренцию тепловым насосам. Наконец, высокая стоимость монтажных и инженерных работ по установке теплового насоса играет значительную роль для применения этой технологии в нашей стране, где экономические особенности затрудняют применение технологий, имеющих высокие сроки окупаемости [1]. Все это ставит Россию в число стран, отстающих по применению тепловых насосов от большинства развитых стран, хотя эта технология имеет у нас большие перспективы. Таким образом, внедрение тепловых насосов в отечественную городскую инфраструктуру требует иных подходов.

Прежде всего следует рассмотреть различные пути применения тепловых насосов и способы забора низкопотенциального тепла. Во-первых, это использование отходов теплоты, таких как сточных вод коммунальных сетей и промышленных предприятий. Использование тепловых насосов в данном направлении позволяет не только утилизировать вредное для окружающей среды тепло, но и подготовить воду для объектов, где требуется охлаждаемая оборотная вода [2]. Кроме того, тепловые насосы позволяют проводить вентиляцию зданий, осушение и обезвоживание, термическое разделение веществ и применять другие технологии, требуемые в промышленности [3].

Среди способов применения тепловых насосов в общественных сооружениях наиболее перспективным является их использование для подогрева и регулирования температуры воды в бассейне. Постоянный подогрев больших

масс поступающей воды, наряду с большими сбросами отработанной воды в канализацию, позволяет применить тепловые насосы в двух направлениях. Тепловые насосы могут не только подогревать воду в бассейне, но и утилизировать тепло сточных вод с дальнейшей выработкой тепла для приготовления горячей воды [4].

Использование тепловых насосов в жилищно-коммунальной сфере поможет повысить эффективность как индивидуальных систем отопления, так и сетей центрального отопления. Однако их внедрение в данную сферу требует особого подхода, связанного с выбором источника тепла и различных подходов использования тепловых насосов, в том числе для кондиционирования зданий и утилизации тепла сточных вод [5].

В дальнейшей работе предполагается теоретически рассмотреть способы применения тепловых насосов для существующих промышленных объектов города Челябинска. Будет проведён обзор заводов, фабрик, электростанций, коммунальных сетей, бассейнов и прочих объектов, где существует возможность осуществления утилизации тепла и подготовки воды с помощью тепловых насосов, рассмотрены принципы осуществления таких технологий. На основе полученных данных будет произведена экономическая оценка рассмотренных технологий.

#### Список литературы

1. Филиппов С. П., Дильман М. Д., Ионов М. С. Перспективы применения тепловых насосов в России // Энергосовет. 2011. № 5 (18). С. 42–46.
2. О тепловом ресурсе сточных вод и его использовании / Г. П. Васильев, Д. Г. Закиров, И. М. Абуев, В. Ф. Горнов // Водоснабжение и канализация. 2009. № 7–8. С. 54–58.
3. Хайнрих Г., Найорк Х., Нестлер В. Теплонасосные установки для отопления и горячего водоснабжения : пер. с нем. М. : Стройиздат, 1985. 352 с.
4. Садовников А. А. Использование тепловых насосов для подогрева воды в бассейнах // Сантехника. 2013. № 2. С. 18–26.
5. Бриганти А. Тепловые насосы в жилых помещениях // АВОК. 2001. № 5. С. 24–30.

УДК 620.92

Черепанова О. А., Хасанов Р. Р., Семенов Н. А., Богатова Т. Ф.  
Уральский федеральный университет,  
tb-upi@mail.ru

## МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Развитие угольной генерации способствует обеспечению системной надёжности энергетики. В Энергетической стратегии России [1], а также в Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики (до 2030 г.) [2] запланированы к этому сроку ввод новой и модернизация уже действующей угольной генерации общей мощностью 26,1 ГВт. Основной ввод новой угольной генерации планируется в регионах Сибири и Дальнего Востока, поскольку именно там сосредоточены крупнейшие угольные бассейны, а каждый второй киловатт-час производится на угле, в то время как в европейской части 90 %

электроэнергии вырабатывается на газе. Так, в 2012–2013 гг. были запущены третий энергоблок на Харанорской ГРЭС в Забайкалье и четвертый блок Гусиноозерской ГРЭС в Бурятии. На стадии проектирования и строительства находятся еще три угольные станции – Сахалинская ГРЭС-2, Совгаванская и Благовещенская ТЭЦ.

Огромный резерв для инновационного развития энергетики заложен в повышении эффективности и экологичности технологий угольной генерации.

Одним из направлений развития угольной генерации является совершенствование паротурбинных энергоустановок на базе традиционного прямого пылеугольного сжигания. Сжигание топлива с использованием суперсверхкритических параметров пара (ССКП) рассматривается сегодня в качестве энергоэффективной технологии на ближнесрочную перспективу. В настоящее время уже освоенным считается уровень параметров ССКП: давление острого пара до 30 МПа, температура острого пара до 600–650 °С и температура промежуточного перегрева (одного или двух) до 620 °С. КПД нетто таких энергоблоков составляет 43–44 %. Кстати, экспериментальная турбина с такими параметрами мощностью 100 МВт была установлена в России на Каширской ГРЭС еще в 1969 г. Ожидается, что КПД энергоблоков на каменном угле при температуре пара 700 °С, которая может быть достигнута к 2020 г., составит 45–47 %.

Наиболее активно разработка технологий, связанных с ростом параметров паросилового цикла, проводится в странах ЕС, США и Японии [3]. При поддержке Европейской комиссии разрабатывается пылеугольный блок с перегревом пара до 700 °С и давлением 37,5 МПа с двумя промперегревами 12,5 МПа/720 °С. Такие параметры пара в сочетании с глубоким вакуумом в конденсаторе  $(0,015–0,021) \cdot 10^5$  Па должны обеспечить КПД блока на природном газе на уровне 53–54 %.

Преимуществом традиционного направления является то, что это технологии прямого сжигания, хорошо освоенные производителями энергетического оборудования и отработанные в эксплуатации. Однако переход на новый уровень температур пара требует использования более жаростойких материалов для основных высокотемпературных деталей котла, турбины и паропроводов свежего и вторичного перегретого пара. Недостатками являются высокие издержки в системе газоочистки, повышенные требования к качеству топлива. Ухудшение качества топлива в долгосрочной перспективе при увеличении объемов его переработки и принципиально новый уровень требований к экологической стороне процесса, связанный с проблемой глобального потепления, существенно ограничивают конкурентные преимущества этого направления.

Ближайшим конкурентом ССКП-технологии является ступенчатое сжигание (ВЦГ-ПГУ). Внутрицикловая газификация (ВЦГ) требует разработки специализированных турбин для сжигания синтез-газа. Такие турбины уже предложены ведущими компаниями – *Ansaldo* (Италия), *MHI* (Япония) и *Siemens* (Германия). Лучшие современные образцы ВЦГ-ПГУ имеют КПД 44–46 %, а в перспективе – до 55–56 %. Прямое сжигание с ССКП, с его современным КПД 43–44 % и перспективой до 50 % и выше, возможно, проще по конструкции, однако заметно дороже по материалам. Последнее обстоятельство примерно выравнивает конку-

рентные свойства ССКП и ВЦГ-ПГУ. В частности, Китай планирует наращивать свои ССКП-мощности, однако предпочтение отдает ВЦГ-ПГУ: темпы прироста мощности ВЦГ-ПГУ после 2015 г. будут примерно вдвое выше, чем для ССКП [4]. Существенным фактором конкуренции является вероятная необходимость введения технологий улавливания и захоронения углекислого газа *CCS*, при которых стоимость улавливания  $CO_2$  может оказаться определяющей. Введение мероприятий по улавливанию в меньшей степени коснется ВЦГ-ПГУ, тогда как установки прямого сжигания, включая ССКП, по-видимому, будут массово переводить на технологию *Oxyfuel*.

Технологии на природном газе и технологии прямого сжигания угля представляют собой ближайших конкурентов внутрицикловой газификации угля как на отечественном, так и на мировом рынке энергетических технологий.

Для успешной конкуренции с ССКП технологиям газификации необходимо существенно сократить удельную стоимость установленной мощности. Соревнование двух классов технологий в этой сфере подвержено влиянию конъюнктуры в борьбе с глобальными изменениями климата, которая выходит далеко за рамки энергетики. Обязательность улавливания и захоронения углекислого газа (*CCS*), вероятность возникновения которой высока, в неравной мере скажется на технологиях конверсии и прямого сжигания и в заметно большей увеличит себестоимость последних. С одной стороны, Россия пока не взяла на себя жестких обязательств по сокращению выбросов  $CO_2$ , а с другой – отечественной энергетике необходимо иметь готовые технические решения на тот случай, если это произойдет. Это делает опережающую разработку отечественной ВЦГ-ПГУ крайне актуальной.

Анализ технико-экономических параметров различных технологий сжигания угля (см. таблицу) позволяет сделать вывод, что технологии газификации имеют существенный технико-экономический, экологический потенциал, энерго-ресурсосберегающий эффект и на перспективу являются одним из базовых направлений развития мировой твердотопливной энергетики и промышленности.

Технико-экономические параметры различных технологий сжигания угля [5]

Параметры	Тип станции, топливо, параметры пара					
	уголь	уголь	уголь	уголь	уголь	природный газ
	ПСТ, докритический, 18,0 МПа, 540/540 °С	ПСТ, сверхкритический, 25,0 МПа, 560/560 °С	ПСТ, суперсверхкритический, 30,0 МПа, 600/620 °С	ПСТ, ультра-суперсверхкритический, 35,0 МПа, 700/700 °С	IGCC, 3 контура давления, 12,4 МПа, 560/560 °С	ПГУ, 3 контура давления, 12,4 МПа, 560/560 °С
1	2	3	4	5	6	7
Номинальная мощность, МВт	500	500	500	500	500	500
Собственные нужды, МВт	42	42	44	43	67	11
Мощность на выходе, МВт	458	458	456	457	433	489
КПД брутто, %	43,9	45,9	47,6	49,9	50,9	59,3

Окончание табл.

1	2	3	4	5	6	7
КПД нетто, %	40,2	42,0	43,4	45,6	44,1	58,1
Эмиссия, т/ч	381	364	352	336	321	170
Удельные эмиссии, т/(МВт·ч)	0,83	0,80	0,77	0,73	0,74	0,35

*Примечание.* ПСТ – прямое сжигание топлива (угля); IGCC – интегрированный комбинированный цикл с газификацией топлива; ПГУ – парогазовая установка

#### Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года – утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 года № 1715-р [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/96681/> (дата обращения: 21.11.2014).
2. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2030 года – одобрена Правительством Российской Федерации, протокол от 3 июня 2010 г. № 24 [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902091165> (дата обращения: 21.11.2014).
3. Power Generation From Coal 2010 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iea.org/publications/> (дата обращения: 21.11.2014).
4. Jianxiong Mao How does China reduce CO<sub>2</sub> emissions from coal fired power generation? Activities and deployment of clean coal power generation and carbon capture in China // World Bank 2009 Energy Week. Washington DC. 2009, march 31 – april 2.
5. Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050. Paris: OECD / IEA. 2008. 644 p.

УДК 621.318

Черноскутов Д. В.  
Уральский федеральный университет,  
[chernoskutov1989dv@mail.ru](mailto:chernoskutov1989dv@mail.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ИЗОЛЯЦИОННОГО И ДУГОГАСИТЕЛЬНОГО СРЕДСТВА ДЛЯ КОММУТАЦИОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АППАРАТА

В настоящее время в электротехнической сфере в соответствии с принятым в 1997 г. Киотским протоколом [1], обязывающим снизить объем выброса парниковых газов, осуществляется поиск альтернативных средств, которые могут быть использованы в высоковольтной аппаратуре в качестве электроизолирующего и дугогасящего средства. Приоритетной линией мирового развития электроаппаратостроения является выбор в пользу экологически чистых материалов, способных в полной мере заменить существующие изолирующие среды, при этом сохранить и даже повысить номинальные технические параметры разрабатываемых высоковольтных аппаратов. В качестве такой альтернативной передовой инновационной технологии газовой изоляции в данной статье рассматривается углекислый газ CO<sub>2</sub>.

На базе высоковольтной лаборатории испытательного центра ЗАО «Эльмаш (УЭТМ)» были проведены исследовательские высоковольтные и климатические испытания выключателя ВГТ-110 с заполнением углекислым газом  $\text{CO}_2$  и азотом  $\text{N}_2$  при абсолютном давлении заполнения 0,8–0,9 МПа. Результаты представлены в таблице.

Результаты высоковольтных испытаний между контактами

Вид испытаний	Внутренняя изоляция	Абсолютное давление, МПа	Норма, кВ	Результат испытаний, кВ	Заключение	
Напряжение полных грозовых импульсов	CO <sub>2</sub>	0,8	450	-500	Выдержал	
				+500	Выдержал	
				-550	3 разряда из 5 импульсов	
				+550	3 разряда из 10 импульсов	
		0,85		-550	Выдержал	
				+550	Выдержал	
	N <sub>2</sub>	0,85	450	-400	Выдержал	
				+400	Выдержал	
				-450	2 разряда из 2 импульсов	
				+450	Выдержал	
		0,9		-500	Выдержал	
				+500	Выдержал	
				-550	3 разряда из 14 импульсов	
				+550	3 разряда из 7 импульсов	
Напряжение промышленной частоты	CO <sub>2</sub>	0,85	230	230 5 минут	Выдержал	
		0,1	126	75 кВ разряд при подъеме	Не выдержал	
	N <sub>2</sub>	0,9	230	230 5 минут	Выдержал	
		0,1	126	70 кВ разряд при подъеме	Не выдержал	

Получена диаграмма состояния углекислого газа при различных температурах с кривой насыщения (рис. 1).

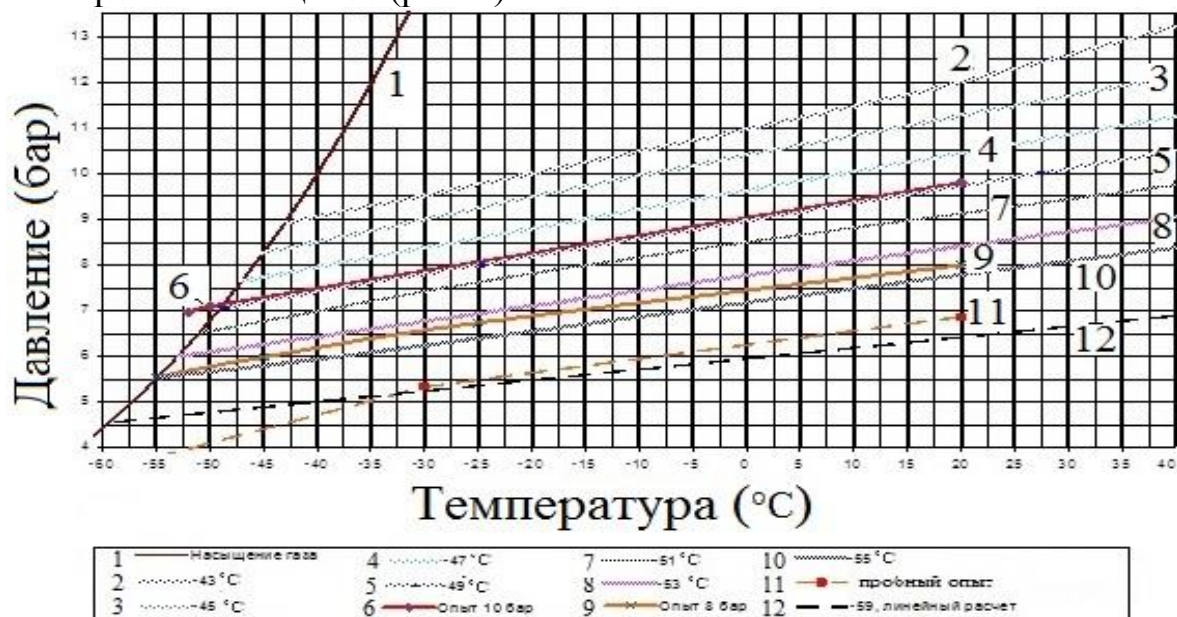


Рис. 1. Диаграмма состояния  $\text{CO}_2$

Из сравнения полученных данных с диаграммой состояния элегаза можно сделать вывод о том, что углекислый газ при давлении заполнения 1 атм сжижается при более низких температурах порядка  $-78^{\circ}\text{C}$  вместо  $-51^{\circ}\text{C}$  для элегаза.

С точки зрения эффективности гашения электрической дуги в источниках [2–4] приводятся результаты исследования роста давления элегаза  $\text{SF}_6$  и углекислого газа  $\text{CO}_2$  в компрессионном объеме при отключении больших токовых плотностей 28,4 кА. На рис. 2, а, б представлена зависимость углов  $\alpha$  и  $\beta$ , которые характеризуют скорость истечения газа из объема сжатия дугогасительной камеры высоковольтного выключателя, от времени с момента размыкания контактов, а также изменение роста давления от этого параметра и от времени горения дуги.

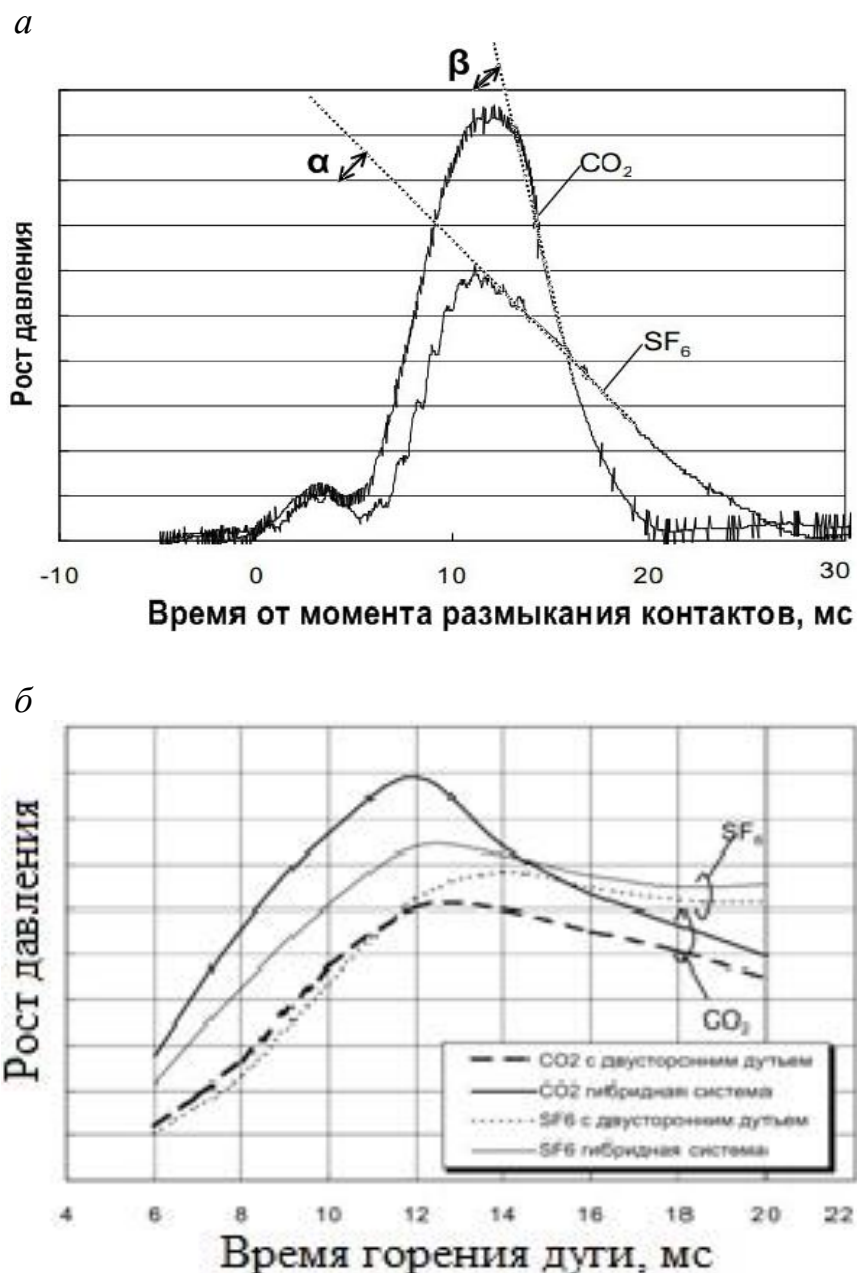


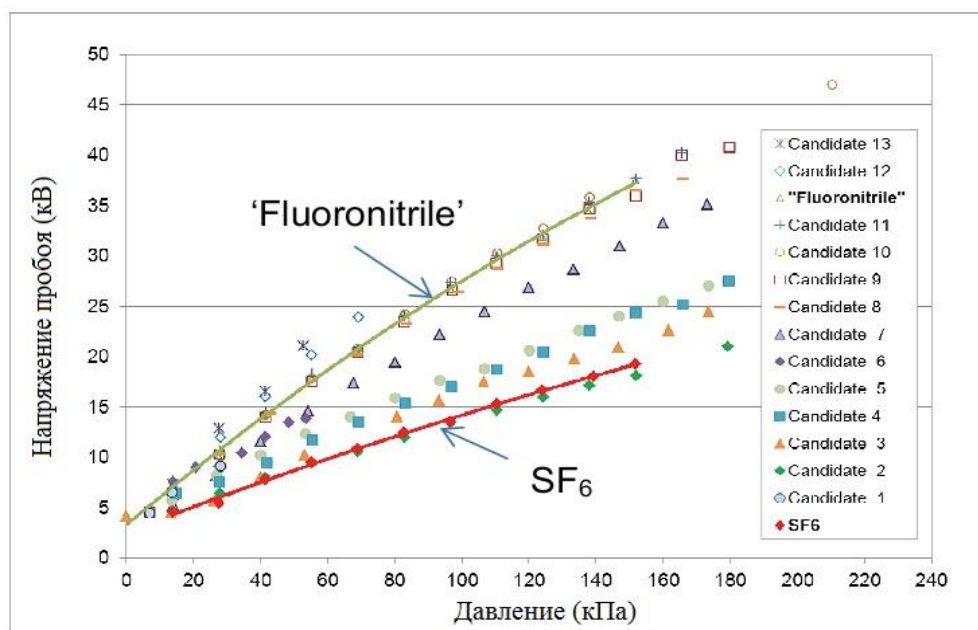
Рис. 2. Измеренный рост давления:

*а* – зависимость углов  $\alpha$  и  $\beta$  от времени с момента размыкания контактов;  
*б* – от времени горения дуги



Авторы работы [5] приводят данные по исследованию инновационного изолирующего и дугогасящего газа чистого фторнитрила, превосходящего по своим изоляционным характеристикам существующие газы (рис. 3, а, б). Недостатком этого инновационного решения по применению газа фторнитрила является температура сжижения  $-4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  при 1 атм, поэтому применяется смесь чистого фторнитрила с  $\text{CO}_2$  в пропорции 20/80 для достижения электрической прочности, идентичной прочности элегаза, при этом температура сжижения составляет  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  при давлении смеси 5,5 атм [5].

а



б

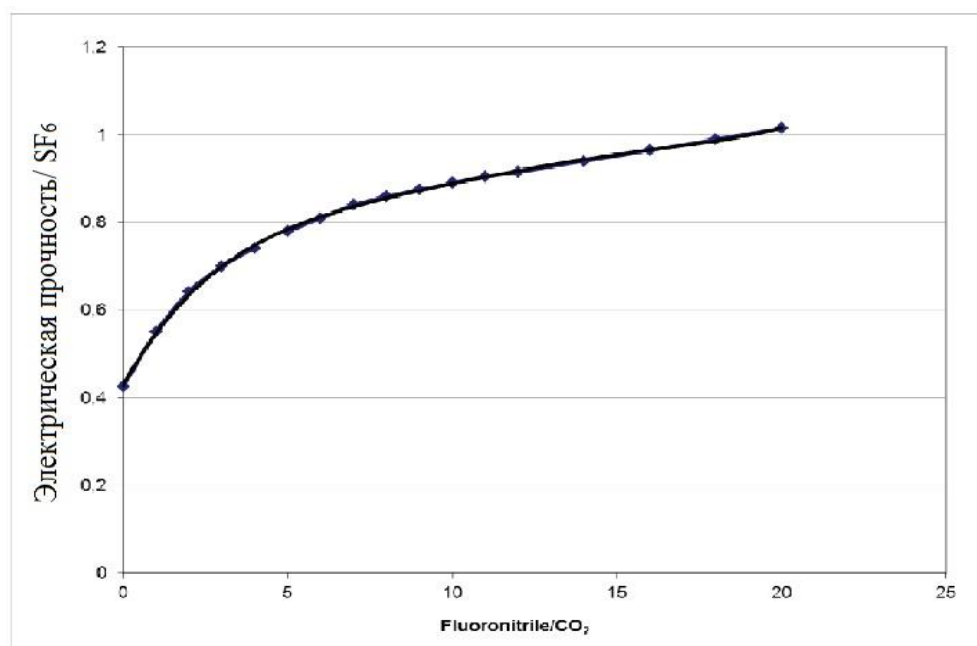


Рис. 3. Сравнение электрической прочности  $\text{SF}_6$  со фторнитрилом при межконтактном промежутке 2,5 мм:  
а – дисковые электроды; б – кривая зависимости электрической прочности от соотношения фторнитрила /  $\text{CO}_2$  в смеси

Приведенные в данной статье результаты анализа показали, что углекислый газ и фторнитрил по своим электрофизическим и химическим свойствам способны выполнять функции электроизолирующего и дугогасящего газа, при этом не токсичны, могут быть использованы при низких температурах: углекислый газ до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , смесь углекислого газа и фторнитрила до  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  без использования элементов подогрева. В результате этого исчезает необходимость установки и размещения элементов подогрева, снижается величина энергопотребления на собственные нужды в условиях размещения электрооборудования в регионах с низкими рабочими температурами.

#### Список литературы

1. Федеральный закон от 4.11.2004 № 128-ФЗ «О ратификации Киотского протокола к рамочной конвенции организации объединенных наций об изменении климата» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.garant.ru/hotlaw/federal/110480/> (дата обращения: 29.10.2014).
2. Fundamental Properties of CO<sub>2</sub> Gas as an Arc Quenching Medium and Thermal interruption performance of full-scale GCB Model / Uchii T., Kawano H., Nakamoto T., Mizoguchi H. // IEE-J Trans. B. 2004. Vol. 124. N 3. P. 469–475.
3. Fundamental research on SF<sub>6</sub> free Gas Insulated Switchgear adopting CO<sub>2</sub> gas and its mixtures / T. Uchii, Y. Hoshina, H. Kawano, K. Suzuki, T. Nakamoto // Proceedings of International Symposium on Eco Topia Science. 2007. P. 1296–1299.
4. CO<sub>2</sub> Circuit Breaker Arc Model for EMTP Simulation of SLF Interrupting Performance / K. Udagawa, T. Koshizuka, T. Uchii, T. Shinkai, H. Kawano // International Conference on Power Systems Transients (IPST 2011). Delft (the Netherlands), 2011. June 14–17 [Электронный ресурс]. URL: [http://ipstconf.org/papers/Proc\\_IPST2011/11IPST037.pdf](http://ipstconf.org/papers/Proc_IPST2011/11IPST037.pdf) (дата обращения: 29.10.2014).
5. SF<sub>6</sub> Alternative development for high voltage switchgears / Y. Kieffel, A. Girodet, F. Biques, Ph. Ponchon (Alstom Grid, France), J. Owens, M. Costello, M. Bulinski, R. Van San, K. Werner (3M Company, USA, Belgium) // CIGRE 2014: Conference paper D1-305. Paris, 2014 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cigre.org> (дата обращения: 29.10.2014).

УДК 66.067.1

Шаймуллина Э. А.  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
[sh.elmira@yandex.ru](mailto:sh.elmira@yandex.ru)

### **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРИСТОГО СЛОЯ ТКАНЕВОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ**

Технический прогресс и бурное развитие промышленности, энергетики, сельского хозяйства последнего времени сопровождались резким увеличением загрязняющих веществ в атмосфере. По оценкам специалистов [1] в настоящее время промышленностью и транспортом в атмосферу планеты ежедневно вы-

брасывается до 1 млрд т пыли, что приводит к тяжелым последствиям для окружающей среды и крайне вредно действует на здоровье людей и животных.

Одним из наиболее широко используемых высокоэффективных методов очистки запыленных газовых потоков является процесс фильтрации. Очистка газового потока от загрязненных взвешенных частиц происходит при его прохождении через слой пористого материала. У фильтрующегося материала структура пористого слоя фильтра представляет собой хаотическую систему каналов и препятствий. Дисперсная часть выброса отделяется от газового потока в результате столкновения и прилипания частиц к препятствиям.

В связи с продолжающим нарастанием загрязняющих веществ в атмосферу в ближайшем будущем потребуются высокие технологии тонкой очистки газовых потоков от загрязненных взвешенных частиц, что обуславливает необходимость исследования процесса тонкой (окончательной) фильтрации субмикронных аэрозолей.

Одно из наиболее действенных средств тонкой очистки выбросов с дисперсными загрязнителями – пористые фильтры, среди которых наибольшую степень очистки обеспечивает использование волокнистых структур. Вместе с тем волокнистые фильтры энергозатратны, сложны в регенерации и имеют довольно высокую стоимость, что ведет к необходимости выполнения комплекса исследований в направлении совершенствования очистных технологий с их использованием.

Волокнистые структуры заменимы на тканые структуры, что открывает возможность решения проблемы ресурсосбережения. Однако на сегодняшний день недостаточно разработаны подходы к расчетам оптимальных параметров работы тканевых фильтров с реальной структурой, учитывающим образование автослоя. Недостаточно изучены вопросы взаимодействия загрязненных частиц с элементами фильтрующей среды. Обычно степень осаждения рассчитывается по эмпирическим зависимостям, которые получены на моделях препятствий, превышающих размеры волокон и нитей фильтрующего слоя на 2–3 порядка, ввиду чего они могут вносить существенные изменения в структуры потока. При фильтрации в пористом слое тканевого фильтра размеры препятствий и взвешенных частиц сопоставимы, что позволяет ожидать соизмеримости вносимых возмущений.

Целью работы является исследование процесса фильтрационной очистки выбросов в пористом слое тканевого фильтра со структурой, приближенной к реальной структуре.

Уточненное изучение процесса обтекания препятствий размером менее  $10^{-3}$  м может быть выполнено на основе численного эксперимента методами вычислительной гидродинамики (*Computational Fluid Dynamics, CFD*). В данной работе изучалась возможность адекватного моделирования геометрии пористой среды тканевого фильтра в начальном состоянии, от которого при неизменных характеристиках запыленности потока зависит скорость образования фильтрующего автослоя на ткани. Были проведены численные исследования схем обтекания газовым потоком двух непроницаемых препятствий круглого сечения диаметром  $D_{об} = 50$  мкм в прямоугольном канале  $400 \times 200$  мкм методом

RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*, 2d-модель) и  $400 \times 200 \times 1000$  мкм методом LES (*Large Eddy Simulation*, 3d-модель). Расстояние от центра препятствия до стенки канала 50 мкм, между центрами препятствий 100 мкм (см. рисунок). Исследования проводились при различных значениях числа Рейнольдса для препятствия  $Re_{ob}$  (0,1–100). Такая схема рассматривалась как приближенная к начальной структуре тканевого фильтра, поскольку габариты портов пропуска потоков (проходов между непроницаемыми объектами) соизмеримы по размеру с препятствиями.

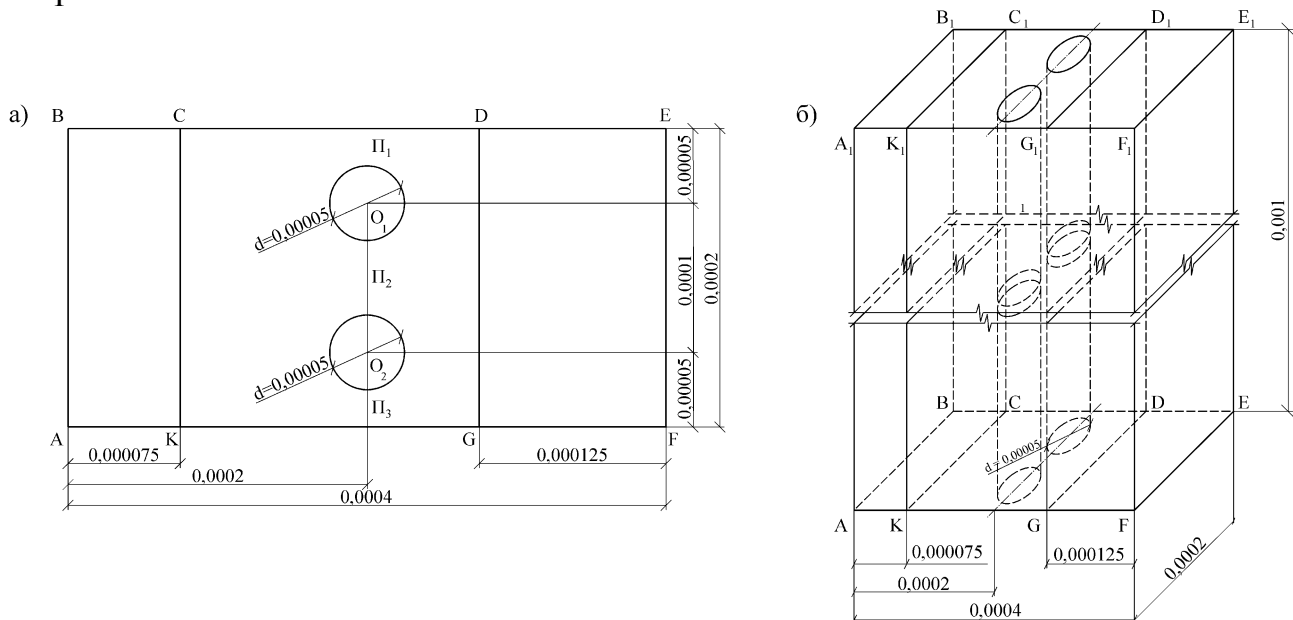


Схема обтекания потоком двух препятствий в канале размером  $400 \times 200$  мкм при решении методами RANS (а) и LES (б)

В численном эксперименте давление, температура и средняя влажность потока приняты постоянными, а процесс – происходящим без фазовых переходов. Решалась изотермическая задача, сжимаемость потока газа не учитывалась. Плотность и динамическая вязкость потока приняты постоянными и определены по воздуху для температуры  $20^\circ\text{C}$ :  $\rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$ ,  $\eta = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Запыленность потока не учитывалась, частицы потока не моделировались.

Были приняты следующие граничные условия: вход в канал – *velocity-inlet*, выход из канала – *pressure-outlet*, ограждения канала и поверхности обоих препятствий – *wall*.

Проведенные исследования показывают, что при фильтрации с  $Re_{ob}$  вплоть до 100 (т. е. до значения скоростей, превышение которого в тканевых фильтрах на практике не встречается) зоны чистых потенциальных течений в пористой среде отсутствуют. Структура потока образуется как результат сложного взаимодействия большого числа вязких пограничных слоев у препятствий и ограждений, накладывающихся на отдельные участки потенциальных течений. Так, например, в рамках рассмотренной предельно упрощенной модели фильтрующих элементов из двух круглых препятствий микрометрового и двух плоских ограждений сантиметрового диапазонов размеров прохождение потока регулируется посредством взаимовлияния энергий четырех вязких пограничных слоев двух препятствий с одним потенциальным течением между ними, которые два-

жды перекрываются вязкими слоями противоположных ограждений. Очевидно, что с любым изменением геометрических характеристик системы изменится и энергетический баланс вязких структур потока [2].

Проведенные исследования обтекания потоком двух препятствий в канале методами RANS и LES показали непротиворечивые и сопоставимые друг с другом результаты.

Следовательно, параметры прохождения потока при фильтрации через пористую среду в определенной степени зависят от структуры фильтра, характерными параметрами которого при использовании тканых материалов являются расстояния между нитями (элементами), формы их сечения, способы сочетания, расположение относительно потока. Это предоставляет возможность оптимизации энергопотребления процесса фильтрации путем подбора оптимальных геометрических параметров пористой среды.

#### Список литературы

1. Романюк Ю. В. Процесс пылеулавливания из аспирационных и технологических пылегазовых потоков комбинированными фильтровальными структурами : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2010. 18 с.
2. Зиганшин М. Г., Шаймуллина Э. А. Параметры обтекания газовым потоком элементов структуры тканевого фильтра в CFD-модели // Известия КазГАСУ. 2013. № 1 (23). С. 129–134.

УДК 621.357.1

Шанаурин А. В., Шнайдер Е. А., Чернышов А. А., Останин Н. И.  
Уральский федеральный университет,  
n.i.ostanin@urfu.ru

### **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИЗА НА ВЫХОД ПО ТОКУ ПРИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИИ НИКЕЛЯ ИЗ СУЛЬФАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ**

Получение чистых металлов электроэкстракцией из водных растворов электролитов является энергозатратным производством. Удельный расход электроэнергии составляет 3400–4000 кВт·ч на тонну катодного никеля. Основными факторами, влияющими на энергопотребление, являются напряжение на ванне и катодный выход по току. Снижения напряжения на ванне добиваются введением в раствор компонентов, увеличивающих его электропроводность, повышением температуры электролита, использованием новых диафрагменных материалов, обеспечивающих минимальное падение напряжения. Увеличения катодного выхода по току никеля достигают подбором состава электролита и условий электролиза.

Целью работы является выбор параметров электролиза, позволяющих получить максимальный выход по току при электроосаждении никеля из сульфатного электролита.

Установка для определения выхода по току представляла собой систему из двух бездиафрагменных ячеек, помещенных в термостат, и медного кулонометра. Для того чтобы минимизировать изменение концентрации ионов никеля и  $pH$  раствора в течение опыта, электролиз проводили с растворимыми никелевыми анодами. В качестве катода использовали титановую матрицу, которую для облегчения снятия осадка никеля предварительно анодировали в течение получаса в растворе серной кислоты. Электролит, содержащий 100 г/л  $Ni^{2+}$ , готовили из сульфата никеля марки «хч». Корректировали  $pH$  раствора добавлением серной кислоты марки «осч» или карбоната никеля. Продолжительность электролиза составляла 1 час.

Анализ влияния параметров электролиза на катодный выход по току проводили с использованием метода планирования эксперимента. Интервалы варьирования факторов приведены в таблице.

Уровни факторов и интервалы варьирования

Изучаемые факторы	$pH$	Температура электролита, °C	Катодная плотность тока, А/м <sup>2</sup>
Основной уровень	2,5	65	250
Интервал варьирования	0,5	5	50
Верхний уровень	3	70	300
Нижний уровень	2	60	200
Обозначение переменных	$X_1$	$X_2$	$X_3$

В каждой точке плана проводили по несколько параллельных опытов. Во всех опытах получены ровные матовые катодные осадки никеля. После статистической обработки экспериментальных результатов получено уравнение регрессии, устанавливающие функциональную зависимость между выходом по току и параметрами электролиза:

$$B_T = 95,69 + 1,35pH + 0,81b_2 \cdot t + 0,37i - 0,28pH \cdot t - 0,53pH \cdot i - 0,13t \cdot i + 0,50pH \cdot t \cdot i.$$

Уравнение регрессии после исключения незначимых коэффициентов имеет следующий вид:

$$B_T = 95,69 + 1,35pH + 0,81t.$$

Следовательно, в исследованном интервале изменения факторов на выход по току никеля значимое влияние оказывают только  $pH$  и температура электролита. Увеличение выхода по току будет происходить при повышении температуры электролита и  $pH$ . Эти результаты согласуются с данными других авторов. Оценка, выполненная с помощью критерия Фишера, показала, что полученное уравнения регрессии верно описывает экспериментальные данные.

Таким образом, с помощью метода планирования эксперимента установлены условия электролиза, при которых электроэкстракцию никеля из сульфатного электролита можно проводить с высокими технико-экономическими показателями и сократить расход электроэнергии.

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЛЭП И КОНТАКТНЫХ ПРОВОДОВ ЗА СЧЕТ ПРОВЕДЕНИЯ СВОЕВРЕМЕННЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Контактные провода и ЛЭП в системе электроснабжения железных дорог подвергаются значительным токовым нагрузкам. Кроме того, существенное влияние оказывают климатические факторы: гололед, перепады температур, ветер. Контактные провода, кроме нагрузок, характерных для ЛЭП, испытывают колоссальные нагрузки, возникающие в процессе токосяема и скольжения ползоза токоприемника. В связи с этим контактные провода с течением времени изнашиваются, а провода ЛЭП подвергаются старению и разрегулировке.

Степень износа контактного провода – это важнейший параметр, который необходимо контролировать во время эксплуатации контактной сети. При достижении определенного значения износа контактный провод может оборваться.

Обрыв провода влечет за собой необходимость внесения внеплановых затрат на ремонт. Однако затраты на ремонт не несут за собой катастрофических последствий. Обрыв провода приводит к остановке движения поездов, а простои поездов приводят к существенным затратам.

Для повышения надежности работы контактной сети в целом и повышения надежности работы контактных проводов и ЛЭП в частности, а также предотвращения наступления ущерба от обрывов следует производить своевременное управляющее воздействие.

Управляющее воздействие может заключаться в следующем:

- своевременном проведении диагностики состояния КП и ЛЭП;
- анализе состояния КП и ЛЭП на основании результатов диагностики;
- замене изношенных участков КП и ЛЭП.

Диагностика контактного провода заключается в проведении измерений его параметров.

В ОАО РЖД в 2007 г. принят стандарт «Устройства электрификации и электроснабжения. Техническое обслуживание и ремонт». Также введен в действие стандарт СТО РЖД 1.12.001–2007 (с 1 января 2008 года), который определяет цель, принципы организации технического обслуживания, ремонта и диагностики устройств электрификации и электроснабжения, в том числе КС.

Применительно к элементам контактной сети в стандарте предусмотрены плановые и внеплановые виды технического обслуживания и ремонта.

Плановый вид технического обслуживания включает в себя:

- объезды и обходы с осмотром;
- диагностические испытания и измерения;

- технические обследования;
- текущий ремонт;
- капитальный ремонт.

Техническое диагностирование необходимо для того, чтобы вовремя предотвращать аварийные ситуации и отказы оборудования.

Для автоматизированных измерений параметров контактного провода на Свердловской дистанции пути применяются вагоны-лаборатории испытаний контактной сети типа ВИКС-ЦЭ в комплексе с лазерной быстродействующей системой диагностики контактного провода «ИЗНОС».

Вагон-лаборатория ВИКС контролирует:

- положение контактного провода относительно оси пути в плане (зиг-заг и вынос) в пределах  $\pm 550$  мм с интервалом 50 мм с точностью  $\pm 50$  мм;
- высоту контактного провода, отжатого измерительным токоприемником, имеющим статическое нажатие 140 Н, в пределах высоты 5500–6800 мм с интервалом 50 мм и точностью  $\pm 50$  мм;
- положение контактного провода отходящей ветви на воздушных стрелках ступенями 50, 100 и 150 мм ниже уровня рабочего провода.

Аппаратура вагона также фиксирует:

- уменьшение расстояния между контактным проводом и точкой крепления стержня фиксатора менее 80 мм;
- удары и подбои при прохождении токоприемника по жестким точкам;
- отрыв полоза токоприемника.

Система «ИЗНОС» предназначена для бесконтактного измерения профиля изношенной части КП (при количестве проводов 1 – 4), вычисления остаточной высоты или площади изношенной части его сечения, определения дефектов его подвески (перевороты провода, возвышение одного провода относительно другого, наклон зажимов и т. д.) и измерения положения провода относительно оси токоприемника (зигзаг). Система «ИЗНОС» обеспечивает возможность оценки сложной конфигурации износа (две площадки износа, наклонный износ и т. п.).

Суть работы быстродействующей системы заключается в подсветке КП плоским лучом лазерного осветителя и приеме отраженного сигнала телевизионными камерами.

Своевременное проведение диагностики КП позволяет выявить места повреждений контактных проводов, участки контактного провода с критичным уровнем износа, нарушения геометрических параметров контактной подвески и пр. Обнаружение таких мест дает возможность предупреждать аварийные ситуации, заменять изношенные провода, не допускать их обрыва.

Эти меры позволяют минимизировать трудозатраты и временные затраты обслуживающего персонала, т. е. отсутствует необходимость устранять последствия аварий, необходимо лишь затрачивать время на ремонт участка. Исчезает необходимость на длительные промежутки времени прерывать движение поездов. Следовательно, сводятся к минимуму простои поездного движения, РЖД не несет значительные финансовые потери.



Работа по исследованию процессов износа контактных проводов не должна ограничиваться вышеперечисленными действиями. После проведения диагностики полученные данные должны быть обработаны и проанализированы. Рассчитываются средние значения высоты КП, площади износа, определяются законы, которым подчиняется имеющееся распределение износа, после чего рассчитывается оптимальный срок проведения управляющих воздействий для конкретного участка.

Следует учитывать, что обеспечение надежности контактных проводов на сколь угодно высоком уровне приведет к существенным расходам на обслуживание. Эксплуатацию контактных проводов необходимо организовывать таким образом, чтобы это было экономически выгодно. Именно для того используются соответствующие методики расчета.

Исследованием процессов износа контактных проводов занимаются в научно-исследовательской лаборатории САПР КС УрГУПС. В настоящее время ведется анализ износа контактного провода на участке «Екатеринбург-Водолазово» Свердловской железной дороги. По результатам предварительных расчетов рекомендовано заменить контактный провод 2МФ-100 на новый по всей протяженности участка. Кроме того, после получения данных от Свердловской железной дороги о величине проходов электроподвижного состава на исследуемом участке, будет рассчитана рекомендованная периодичность проведения управляющих воздействий.

#### Список литературы

1. Галкин А. Г., Ковалев А. А., Кардаполов А. А. Основы технической диагностики : уч.-метод. пособие. Екатеринбург : УрГУПС, 2013.
2. Ефимов А. В., Галкин А. Г. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог / под общ. ред. А. В. Ефимова. Екатеринбург : УрГУПС, 1998. 491 с.
3. Ковалев А. А. Формирование управляющих воздействий на контактной сети с учетом процесса разрегулировок опор. Екатеринбург : УрГУПС, 2013. 74 с.
4. Лаборатория САПР КС [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sapr-ks.usurt.ru> (дата обращения: 16.10.2014).

УДК 62-686

Ямаева А. М., Сарачева Д. А.  
Альметьевский государственный нефтяной институт  
teplotex AGNI@yandex.ru

## СИСТЕМА УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА В ГАЗОПОРШНЕВЫХ АГРЕГАТАХ

Когенерация – это комбинированное производство тепла и электроэнергии. На электростанции с применением технологии когенерации топливо используется для получения двух форм энергии – тепловой и электрической.

Когенераторные электростанции более эффективны в сравнении с электростанциями, производящими только электрическую энергию. С технологией когенерации появляется реальная возможность использовать тепловую энергию, которая обычно уходит в атмосферу через градирни вместе с дымовыми газами.

При использовании эффекта когенерации существенно возрастает общий коэффициент использования топлива. Применение когенерации в значительной степени сокращает затраты на приобретение топлива.

Когенерационная установка является эффективной альтернативой тепловым сетям, благодаря гибкому изменению параметров теплоносителя в зависимости от требований потребителя в любое время года. Потребитель, имеющий в эксплуатации когенераторную электростанцию, не подвержен зависимости от экономического состояния дел больших теплоэнергетических компаний.

Доход (или экономия) от реализации электричества и тепловой энергии за короткое время покрывает все расходы на когенераторную электростанцию. Окупаемость капитальных вложений в когенераторную установку происходит быстрее окупаемости средств, затраченных на подключение к тепловым сетям, обеспечивая тем самым устойчивый возврат инвестиций.

Когенерационная установка хорошо вписывается в электрическую схему как отдельных потребителей, так и любого количества потребителей через государственные электросети. Компактные, экологически безопасные когенераторные электростанции покрывают дефицит генерирующих мощностей в крупных городах. Появление подобных установок позволяет разгрузить электрические сети, обеспечить стабильное качество электроэнергии и делает возможным подключение новых потребителей.

Когенерационная установка состоит из четырех основных частей: первичный двигатель, электрогенератор, система утилизации тепла, система контроля и управления.

Принцип работы системы утилизации тепла заключается в следующем: образующаяся при работе двигателя теплота отбирается из контура охлаждения и от отработавших газов, а затем передается нагреваемому теплоносителю. Первой ступенью подогрева является утилизационный теплообменник, а второй – котел-утилизатор. Третьей ступенью является электрический котел, который осуществляет:

- регулирование мощности установки в сторону увеличения тепловой производительности и сглаживание неравномерностей потребления электрической энергии, обеспечивая постоянный уровень производимой тепловой энергии;
- перераспределение нагрузки генератора между потребителем и электрокотлом с учетом неравномерной нагрузки по фазам синхронного генератора, что обеспечивает равномерную работу и снижение интенсивности крутильных колебаний на валу двигателя.

Перечисленные функции электрокотла обеспечиваются благодаря возможности ступенчатого включения электронагревателей контроллерной системой, в которую входят датчики, блок управления, блок коммутации независимо на каждой фазе с обеспечением заданной температуры и суммарной электрической нагрузки генератора.

Внешний радиатор двигателя является по своей сути аварийным радиатором, обеспечивающим обязательное охлаждение двигателя в случае, если система утилизации тепла по каким-либо причинам отключена.

Включение электрокотла в схему когенерационной установки является принципиально новым решением, пока не применяемым на существующих и проектируемых когенерационных установках.

В 2009 г. в Сибирском научном институте авиации были выполнены работы по проектированию системы утилизации тепла на базе двигателя G3516 фирмы *Caterpillar*. Согласно теоретическим расчетам и данным оборудования при работе установки на базе газопоршневого двигателя G3516B, при сгорании топлива выделяется 3140 кВт энергии, из которых 1120 кВт генерируется в виде электрической мощности и 1460 кВт утилизируется в виде тепловой энергии при работе двигателя, осуществляя нагрев  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$  сетевой воды с 70 по 96 °С. В проекте используются отечественные водо- и газоводяные теплообменники фирмы «Гидротермаль». Электрический КПД установки составляет согласно расчетам 36 % и тепловой КПД 46 %, общий же КПД подобной установки достигает 83 %, что существенно снижает затраты на производство и обеспечивает экономическую эффективность внедрения подобных установок.

В процессе проектирования ставилось целью не только провести все теоретические расчеты, но и найти наиболее оптимальную компоновку оборудования. Все оборудование может быть размещено в блок-контейнере для обеспечения возможности транспортировки железнодорожным транспортом, размещения на месте и быстрого ввода в эксплуатацию.

Строительство когенерационных установок возможно на базе двигателей, использующих различные виды топлива в качестве горючего. Могут быть применены природный газ, биогаз, газы мусорных свалок, пиролизные газы, пропан, бутан, дизельное топливо, топочные мазуты, сырая нефть, а в угледобывающих районах еще и метан.

Результаты работы позволяют сделать вывод о целесообразности внедрения когенерационных установок, использующих схему с дополнительным электрическим котлом и контролем нагрузки по фазам генератора для обеспечения теплом и электроэнергией потребителей в местах, где требуется быстрый монтаж и высокая мобильность, а также надежность энергоснабжения.

Использование таких установок обеспечит более благоприятное развитие энергетической инфраструктуры за счет сокращения стоимости производства электрической и тепловой энергии, уменьшения сроков строительства по сравнению со строительством крупных теплоэлектростанций, что приведет к существенным положительным изменениям в экономике и энергообеспечении.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Балдин В. Ю., Селезнева И. С.</b> Первый в России энергоэффективный дом класса А+ строится на Урале.....	5
<b>Балдин В. Ю., Селезнева И. С., Gala Ledieu-Poloskova</b> Повышение энергоэффективности во Франции: опыт A.R.I.E.L и высшей инженерной школы Парижа (MINES-ParisTech).....	14
<b>Абдулгужина И. Р., Матвеев С. В., Картавцев С. В.</b> Источник электроэнергии – теплота разливаемой стали в зоне вторичного охлаждения в МНЛЗ.....	25
<b>Абдуллин Р. Р., Скисов Г. Н., Филипповский Н. Ф.</b> Влияние качества сварного соединения на его теплопроводящие свойства.....	27
<b>Аксёнов Н. А.</b> Расчет энергоэффективности с помощью специального программного продукта <i>SCHNEIDER ELECTRIC</i> .....	30
<b>Аловадинова Х. Н., Картавцев С. В.</b> Модернизация системы охлаждения кристаллизатора МНЛЗ.....	33
<b>Амарская И. Б., Белоусов В. С., Богатова Т. Ф., Рыжков А. Ф., Гордеев С. И.</b> Термодинамическая эффективность парогазового цикла при использовании средне- и низкокалорийного топлива.....	34
<b>Анисимова О. Ю., Шульц Л. Г.</b> Сравнительный тепловой расчет разогрева битума электронагревом и газом.....	37
<b>Антипин А. С., Перельштейн Г. Н.</b> Экспериментальные исследования способов повышения надежности и экономичности разборных контактных соединений электротехнического оборудования.....	40
<b>Анциупов Г. Н., Засельский В. Е., Сесекин А. Н.</b> Об информационном обеспечении задачи о демонтаже радиационно опасного оборудования.....	43
<b>Атаев Т. С., Денисенко В. И., Кычанов М. В.</b> Оценка теплового состояния дизель-генераторной установки закрытого исполнения.....	44
<b>Бабенко И. А., Вальцев Н. В.</b> Модернизация угольных электростанций на примере ТЭС в Боксберге.....	47
<b>Бадыкова Л. Н., Зиганишин А. М.</b> Потери давления в плоском приточном тройнике на слияние.....	50
<b>Баева И. А., Ковалев А. А.</b> Проведение сравнительного анализа проводов линий электропередач.....	53
<b>Бакубаев Б. Т., Денисенко В. И., Пластун А. Т.</b> Разработка высоконадежного асинхронного двигателя с асимметричным магнитопроводом для особых условий эксплуатации.....	55
<b>Бельченко М. А., Попков Д. В., Лесных А. В.</b> Анализ эффективности очистки поверхностей нагрева различными реагентами.....	58
<b>Беляева Г. И., Зиганишин М. Г.</b> Численные исследования энергоэффективности элемента мультицикла для очистки газа на газораспределительных станциях.....	61
<b>Бобич А. А.</b> Интенсивное энергосбережение на ТЭЦ при переходе на парогазовую технологию.....	63
<b>Боровских М. О., Нечаев А. В., Денисенко В. И.</b> Разработка программы для оценки теплового состояния асинхронного двигателя закрытого исполнения.....	66
<b>Бортников М. А., Шемпелев А. Г.</b> Влияние температуры обратной сетевой воды на основные показатели ТЭЦ.....	69
<b>Валиуллина А. А., Евграфов В. А.</b> Оценка погрешности экспериментального коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости.....	71
<b>Ветлов Е. С.</b> Оценка масштабов тепловых потерь в распределительных трубопроводах теплоснабжения на обогрев спутников ХВС.....	74
<b>Гимадиева Г. А., Зиганишин А. М.</b> Потери давления в плоском вытяжном тройнике.....	77

<b>Головин А. А., Куликова Е. А.</b> Решение задачи ресурсосбережения на этапе проектирования с использованием возможностей САПР.....	80
<b>Горшков Е. И., Левин Е. И., Микула В. А.</b> Опыт обследования тепловых сетей микрорайона г. Нижний Тагил.....	83
<b>Гредякин Д. Ю., Василевский Н. С., Щербинин К. А.</b> Об экспериментальной установке по определению фактических тепловых потерь трубопроводами теплоснабжения.....	86
<b>Давыдов С. Я., Чикурова О. С., Обухова А. А., Усманов А. И.</b> Энергосберегающее устройство для выращивания сельхозрастений.....	88
<b>Девецкая Н. А., Картавцев С. В.</b> Повышение энергетической эффективности процессов сухого тушения кокса в условиях ОАО «Уральская сталь».....	90
<b>Дубро А. Е., Жаровцев Р. Д.</b> Цикл Майсоценко. Разработка экспериментальной установки для оценки эффективности цикла	93
<b>Дударев А. В., Стронов Н. В., Лесных А. В.</b> Применение брикетирования для повышения эффективности котельных агрегатов.....	98
<b>Егорова Е. С., Кабанов О. А.</b> Исследование энергоэффективности ламп накаливания различной мощности.....	101
<b>Есаулов В. О., Мухин А. А.</b> Проектирование и оценка эффективности светодиодного энергосберегающего освещения спортивного зала.....	103
<b>Жданова А. Г.</b> Энергоэффективность при проектировании систем лучистого отопления с использованием газа	105
<b>Желонкин Н. В., Рябчиков А. Ю., Аронсон К. Э., Хаев С. И.</b> Применение профилированных трубок для модернизации теплообменных аппаратов паротурбинных установок ТЭС.....	108
<b>Замалиева А. Т., Зиганшин М. Г.</b> Повышение энергоэффективности циклонных устройств очистки промышленных выбросов.....	111
<b>Запарнюк М. Н., Нешипоренко Е. Г.</b> Термодинамическое обоснование условий энергоэффективной переработки сидеритовых руд...	114
<b>Захаров Р. В., Калмыкова Е. А., Картавцев С. В.</b> Чистая угольная ТЭЦ с применением технологии аэрошлакового расплава.....	116
<b>Захарова Г. Б., Кривоногов А. И.</b> Зеленые стандарты и энергоэффективность в реализации образовательной программы «Прикладная информатика в архитектуре».....	118
<b>Земсков П. Д., Краснова Н. П.</b> Перспективы применения различных видов теплоносителей в системах автономного отопления	121
<b>Иванова А. А., Гильметдинова Ю. Р., Микула В. А., Вальцев Н. В.</b> Особенности высокотемпературного нагрева сжатого воздуха.....	124
<b>Исянгильдина Л. Х., Демин Ю. К., Картавцев С. В.</b> Исследование эффекта от применения газовых турбин перед обжиговыми печами.....	127
<b>Казакбаев В. М., Боровских М. О., Нечаев А. В., Прахт В. А.</b> Экспериментальная оценка энергоэффективности частотно-регулируемого электропривода насоса.....	129
<b>Калмыкова Н. С., Мурашова В. Н., Демин Ю. К., Картавцев С. В.</b> Исследование возможности применения ORC в МНЛЗ.....	132
<b>Каргина К. А., Картавцев С. В.</b> Оценка резервов энергосбережения в производстве электроэнергии на ТЭЦ ОАО «Уральская сталь» г. Новотроицк.....	134
<b>Карпиков С. Н., Шемпелев А. Г.</b> Использование теплонасосных установок в системах оборотного водоснабжения с целью повышения эффективности эксплуатации ТЭС.....	137
<b>Кистанов М. В., Рахимова Ю. И.</b> Преимущества теплоизоляционных материалов на основе аэрогеля.....	140
<b>Коньшев Е. К.</b> Технико-экономическое обоснование конструкции тепловой сети по типу «труба в трубе».....	141

<b>Кордюкова Л. С., Бакрунова Т. С.</b> Энергосбережение как основа эффективной экономики страны.....	145
<b>Корнилин М. И.</b> Повышение энергетической эффективности огнетехнических установок за счет термохимической регенерации теплоты.....	148
<b>Кубасов Г. С., Бакрунова Т. С.</b> Анализ эффективности автоматизированных тепловых пунктов	151
<b>Лабинцев Е. С., Каграманов Ю. А., Чернышев В. А., Тупоногов В. Г.</b> Численное моделирование псевдоожигенного слоя с использованием пакета ANSYS FLUENT	154
<b>Лоншаков А. С.</b> Об оценке шлакования при сжигании непроектных углей на ТЭС.....	155
<b>Лукина Ю. Н., Бирюзова Е. А.</b> Преимущества паровинтовой машины при установке ее на предприятии по изготовлению ЖБК	158
<b>Ляпустина К. А., Филиппов П. С., Левин Е. И., Рыжков А. Ф.</b> Использование бедных газов в ПГУ с ВЦГ.....	161
<b>Михайлов Н. Г., Грицук С. А.</b> Энергосбережение в системах теплоснабжения.....	162
<b>Михалап М. А., Толстова Ю. И.</b> Отопление помещения ледовой арены хоккейного корта в г. Сургут.....	165
<b>Морданов С. В., Хомяков А. П., Никулин В. А.</b> Повышение технологической и энергетической эффективности перемешивания азотнокислых растворов урана.....	168
<b>Мурманский И. Б., Аронсон К. Э.</b> Разработка конструкций многоступенчатых пароструйных эжекторов для новых турбин ПГУ...	170
<b>Муслина Д. Б.</b> Энергосберегающий потенциал теплотехнологий легкой промышленности.....	174
<b>Николаев А. В., Мазанкина Д. В.</b> Отопление производственных помещений оборудованием на отработанном масле и применением энергосберегающих технологий.....	176
<b>Овечкин Д. Н., Суворов Д. М.</b> Распределение затрат теплоты по видам энергетической продукции на ТЭЦ, имеющих турбины с противодавлением.....	178
<b>Петракович М. А., Матвеев С. В., Картавцев С. В.</b> Бестопливная ПТУ на теплоте жидкой стали.....	181
<b>Петрова А. Р.</b> Применение ПГУ в энергетике.....	183
<b>Плужникова Н. А., Картавцев С. В.</b> Энергосбережение в промышленности в процессах сжатия воздуха в ОАО «Уральская сталь» г. Новотроицка.....	186
<b>Поздеев А. С., Казакбаев В. М., Прахт В. А., Дмитриевский В. А.</b> Современные типы синхронных двигателей переменного тока с постоянными магнитами на роторе и способы управления ими.....	188
<b>Покрышкин Б. А., Ковалев А. А.</b> Применение САПР для испытания объектов электроэнергетики.....	192
<b>Постников П. П., Постников Р. П., Потапов В. Н.</b> Уточнение интерпретации представлений о крутке потока, формирующего факел, с учетом экологической безопасности горения и экономических аспектов.....	195
<b>Попова А. П., Бакрунова Т. С.</b> Тепловая эффективность зданий промышленного назначения.....	198
<b>Попова Е. С., Чайникова М. А., Шемпелев А. Г.</b> Способы утилизации потерь теплоты с уходящими газами водогрейной котельной за счет снижения температуры обратной сетевой воды.....	201
<b>Рахимова Л. М., Бабин Р. В., Демин Ю. К., Картавцев С. В.</b> Исследование возможности использования теплоты сжатия в АБХМ.....	203
<b>Ряпосов А. В., Костромин К. В., Хомяков А. П.</b> Пути рекуперации тепла в новом методе разрушения солей аммония.....	205
<b>Санникова Д. Д., Некрасов И. И.</b> Производство оребренных труб для теплообменных агрегатов с использованием существующего прокатного и трубозлектросварочного оборудования.....	208
<b>Сафин Н. Р., Прахт В. А., Дмитриевский В. А., Дмитриевский А. А., Смольянов И. А.</b> Мониторинг технического состояния и токовая диагностика подшипников асинхронных двигателей на основе методики векторов парка и вейвлет анализа в целях энергосбережения.....	210

<b>Степанова М. В., Пирогов А. Н.</b> Методические подходы к обеспечению энергетической эффективности при капитальных ремонтах зданий.....	216
<b>Суранов М. В., Таилыков О. Л.</b> Сравнение эффективности использования тепловых насосов для различных источников низкопотенциальной теплоты.....	219
<b>Сызурова М. В., Бакрунова Т. С.</b> Тепловая изоляция как элемент энергосбережения предприятий.....	221
<b>Тарасов А. А., Щеклеин С. Е.</b> Анализ энергетической эффективности способов транспортировки природного газа из мест удаленной добычи.....	223
<b>Тарасова П. С., Вальцев Н. В.</b> Современные парогазовые установки – перспективный способ развития энергетики в России....	225
<b>Тихонова О. В., Малыгин И. В., Пластун А. Т.</b> Некоторые особенности применения пакета «ANSYS MAXWELL» для расчета электрических машин.....	228
<b>Ткачев В. К., Трубицын К. В., Елфимов С. В.</b> Кадровый резерв для инновационно-активных предприятий энергетики.....	230
<b>Усков И. А., Гоман В. В., Федорев С. А.</b> Разработка установки для нанесения защитных металлопокрытий на основе легкоплавких сплавов на контактные поверхности электрооборудования.....	233
<b>Фёдорова Ю. С., Кузнецова Ю. А., Абаимов Н. А.</b> Современные подходы к численному моделированию поточной газификации.....	236
<b>Хайруллин И. А., Матвеев С. В., Картавцев С. В.</b> Оценка мощности тепловыделений горячекатанного листа в теплотехнологии горячей прокатки.....	238
<b>Харитонова О. Д.</b> Эффективное использование энергоресурсов как фактор развития экономики России.....	240
<b>Хасанова Р. В., Демин Ю. К., Картавцев С. В.</b> Совершенствование системы промежуточного охлаждения азотного компрессора.....	243
<b>Хасанова Р. О., Шарифуллина А. Р., Матвеев С. В., Картавцев С. В.</b> Анализ тенденций снижения расходов электроэнергии в электросталеплавильном производстве	246
<b>Хомяков А. Л.</b> Методы повышения эффективности получения тепловой энергии в газовых котлах малой теплопроизводительности.....	249
<b>Худякова Г. И., Щелоков Я. М.</b> Энергоэффективность как объективная реальность.....	252
<b>Цейзер Г. М.</b> Обзор способов применения теплонасосных технологий для городских объектов..	258
<b>Черепанова О. А., Хасанов Р. Р., Семенов Н. А., Богатова Т. Ф.</b> Мировые тенденции развития угольной энергетики.....	259
<b>Черноскутов Д. В.</b> Исследование электрофизических и газодинамических характеристик альтернативного изоляционного и дугогасительного средства для коммутационного электрического аппарата.....	262
<b>Шаймуллина Э. А.</b> Исследование структуры пористого слоя тканевого фильтра на основе CFD-моделирования для повышения энергоэффективности процесса фильтрации.....	266
<b>Шанаурин А. В., Шнайдер Е. А., Чернышов А. А., Останин Н. И.</b> Влияние параметров электролиза на выход по току при электроосаждении никеля из сульфатных электролитов.....	269
<b>Шаюхов Т. Т., Ковалев А. А.</b> Повышение эффективности обслуживания ЛЭП и контактных проводов за счет проведения своевременных управляющих воздействий.....	271
<b>Ямаева А. М., Сарачева Д. А.</b> Система утилизации тепла в газопоршневых агрегатах.....	273

*Научное издание*

**ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.  
ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ.  
НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ  
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

Том 1

Научные редакторы *В. Ю. Балдин, И. С. Селезнева, Г. И. Худякова*

Компьютерная верстка *Г. Н. Мизгулиной*

Корректорская работа – сотрудники РИО ИПЦ УрФУ

*Ответственность за содержание предоставленных материалов  
несут авторы статей*

Подписано в печать 20.04.2015. Формат 60×84 1/16.  
Бумага типографская. Плоская печать. Гарнитура Times New Roman.  
Усл. печ. л. 16,3. Уч.-изд. л. 20,0. Тираж 150 экз. Заказ № 194.

Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8 (343) 350-56-64, 350-90-13  
Факс: 8 (343) 358-93-06  
E-mail: press-urfu@mail.ru